

วงจรรสร้างสัญญาณสัมผัส  
Tangent Generator

และ

ระบบนำวิถีต่อสู้รถถังขนาดเบา  
Anti-tank Missile Guidance System



วิทยานิพนธ์ สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2525

๐๗.

๕๒๒๑.

๒๐๒๐

๓๑.

๐๑๖๑๖

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	
ส่วนที่ 1	
Abstract	1
บทที่ 1 บทนำ	2
บทที่ 2 การวัดโศลป	
2.1 การวัดโศลปโดยใช้วงจร คิฟเพอเรนเช็ยล	4
2.2 การเปรียบเทียบโศลปโดยใช้วงจร คิฟเพอเรนเช็ยลหน่วยเกี่ยว	6
2.3 การเปรียบเทียบโศลปโดยการเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง	7
2.4 เปรียบเทียบโศลปโดยการเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับมาตรฐาน	10
บทที่ 3 ระบบควบคุม โศลป	
3.1 ระบบควบคุม	14
3.2 ส่วนตรวจสอบค่าคลากเคลื่อน	15
3.3 วงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้น	16
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	18
บทที่ 5 วงจรแปลง โศลปเป็นความถี่	
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง โศลปและความถี่	23
5.2 การทำงานของวงจรแปลง โศลปเป็นความถี่	24
5.3 ผลการทดสอบ	26
5.4 การใช้งานเป็นเครื่องมือวัด คาปาซิเตอร์	29
บทที่ 6 วงจร และ รายละเอียดการออกแบบ วงจรแปลง โศลปเป็นความถี่	
6.1 ส่วนจ่ายกำลังไฟ บวก,ลบ	32
6.2 ส่วนขับสัญญาณเปลี่ยนระดับพันไก	33
6.3 ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน	34
6.4 ส่วนตรวจสอบค่าคลากเคลื่อน	35
6.5 ส่วนเปรียบเทียบ และ ส่วนตรวจสอบค่าคลากเคลื่อนสำหรับ แบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง	36
6.6 ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณสองระดับ และ ทดสอบ สภาวะ	37
6.7 ส่วนขับกระแสสลับรูปสี่เหลี่ยม	38
บทที่ 7 บทสรุป	40

## ส่วนที่ 2

Abstract		41
บทที่ 1	บทนำ	42
บทที่ 2	ระบบนำวิถี	
2.1	ระบบแสวงเป้าอัตโนมัติ (Homing method)	44
2.2	ระบบปฏิบัติตามคำสั่ง (Command method)	45
2.3	ระบบนำวิถีที่ทำการพัฒนา	46
บทที่ 3	การนำวิถีของระบบแนวสายตา	48
บทที่ 4	ศึกษาระบบนำวิถีโดยใช้คณิตศาสตร์ต่อเนื่อง	
4.1	กำหนดรูปแบบของค่าคอม	59
4.2	ค่าจำกัดความสำหรับการควบคุม	61
บทที่ 5	คำนวณวิถีจรวดโดยใช้ คณิตศาสตร์ Laplace	
5.1	การเขียน แทนระบบควบคุมด้วย Laplace form ( S-plane )	64
5.2	การคำนวณโดยใช้เครื่องคำนวณ (HP -45)	67
บทที่ 6	ศึกษาผลของ การหน่วงเหนี่ยว ความเร็ว และ ระยะทางที่เปลี่ยนแปลง	
6.1	การหน่วงเหนี่ยวต่อคำสั่งของจรวด	75
6.2	ความเร็ว เป้าหมาย	81
6.3	การ เปลี่ยนแปลงความเร็วของจรวด	88
6.4	ระยะทางที่ เปลี่ยนไป	89
บทที่ 7	วงจรมีฐานยัติกตามในจอโทรทัศน์	
7.1	แผนผังการทำงานของวงจรมีฐานยัติกตาม	92
7.2	หน้าที่ของหน่วยต่างๆ	94
7.3	รายละเอียดวงจรของแต่ละหน่วย	94
บทที่ 8	หน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ และการทดลองใน 1 มิติ	
8.1	วงจรของหน่วยควบคุม	103
8.2	ภาคการทดลอง	105
8.3	ผลการทดลอง	107
บทที่ 9	บทสรุป	109
หนังสืออ้างอิง		110

## กิติกรรมประกาศ

๕

การที่ วิทยานิพนธ์ เล่มนี้สามารถสำเร็จลงได้ก็ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ แก่ รองศาสตราจารย์  
ดร. สิทธิชัย โกโคยอุคม และ ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรตถ ที่ได้ให้ความรู้ และคำแนะนำ  
เป็นอย่างดียิ่งมาโดยตลอด



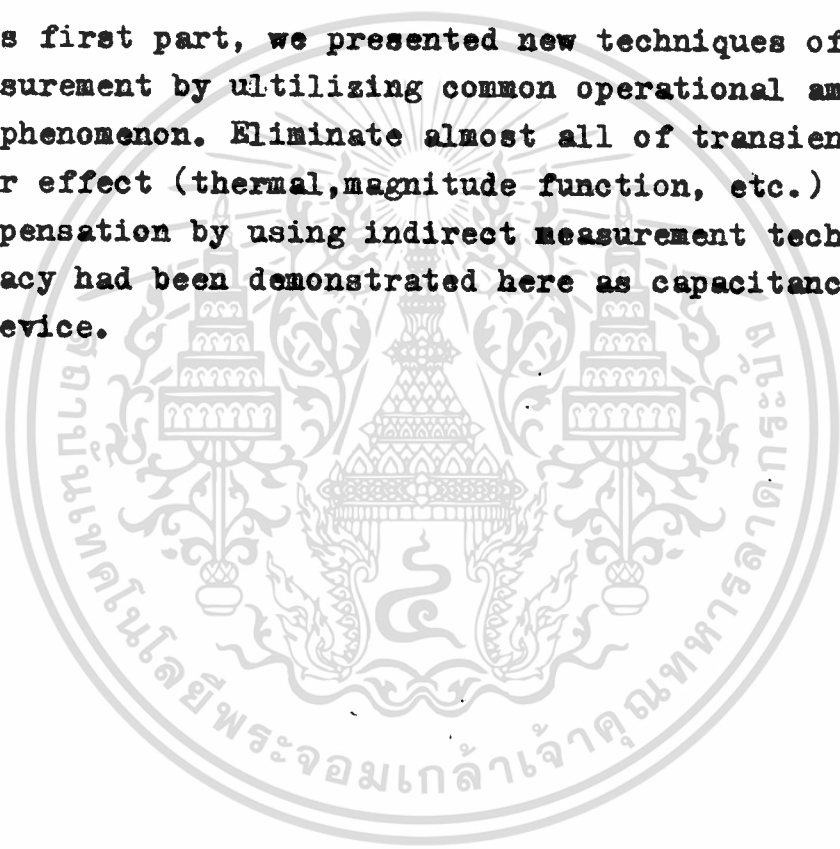


ส่วนที่ 1

Part I

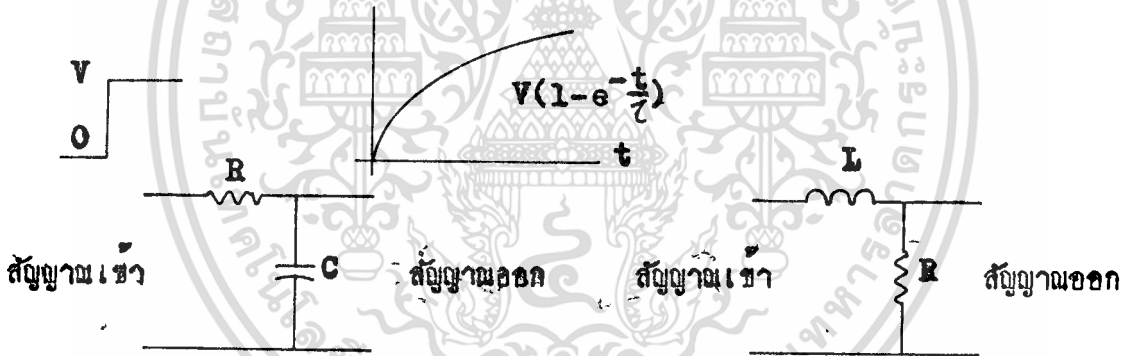
## Abstract

In this first part, we presented new techniques of "slope" measurement by utilizing common operational amplifier comparator phenomenon. Eliminate almost all of transient and offset error effect (thermal, magnitude function, etc.) without need of compensation by using indirect measurement techniques. Their accuracy had been demonstrated here as capacitance measuring device.



ในส่วนแรกนี้ จะได้อธิบายถึงวงจรสร้างสัญญาณสัมพันธ์ ซึ่งจะสร้างสัญญาณเชิงเส้น (หรือสัญญาณรูปสามเหลี่ยม) ให้มีโวลต์เท่ากับโวลต์ของสัญญาณตัวอย่างที่จุดกำหนดให้ใดๆ (จะเป็นที่ระดับสัปดาห์หรือเป็นที่เวลาใดๆก็ได้ ในกรณีที่สัญญาณตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงอย่าง สนิ่ย์รกับเวลา) โดยให้มีความแม่นยำสูง เพื่อให้สามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดได้

ความคิดเบื้องต้นที่นำมาซึ่งการพัฒนาวงจรนี้ เนื่องมาจากจุดประสงค์ที่จะพัฒนาเครื่อง มีอวัคอิมีแค้นซ์ (คาปาซิแค้นซ์) ระบบทรานเซียนหรือแบบนับจำนวนลูกสัญญาณ ซึ่งทั้งสอง แบบนี้โดยทั่วไปแล้วก็ยังมีวิธีการที่แตกต่างกันออกไปอีกมาก ในที่นี้จะขอเสนอวิธีการใหม่ โดยใช้การวัดโวลต์จากการตอบสนองของวงจร RC และ LC ต่อสัญญาณเปลี่ยนระดับ หนึ่งใด กังแสดงไว้ใน (ภาพที่-1) ซึ่งโวลต์ที่จุดเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังนี้



ภาพที่-1 แสดงการตอบสนองต่อสัญญาณเปลี่ยนระดับหนึ่งใด ของวงจร และ

สำหรับวงจร R-C

$$V_c = V(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \tau = RC$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{V}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ที่จุดเริ่มต้น  $t=0$

โวลต์ที่จุดเริ่มต้น

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{V}{\tau}$$

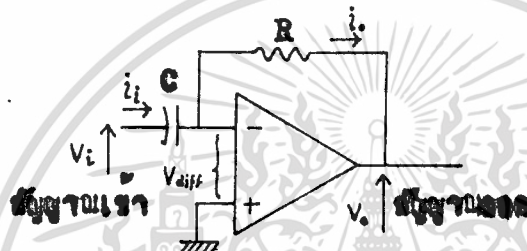
1.1

นอกจากจะได้อำนาจถึงการวัดโศปในลักษณะต่างๆกันแล้ว ยังจะได้เห็นถึงหลักการ  
ออกแบบวงจรสำหรับวัดโศปโดยละเอียด เพื่อให้วงจรมีการทำงานที่แน่นอนและเชื่อถือได้  
และยังได้พัฒนาวงจรแปลงโศปเป็นความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้สามารถใช้  
ประกอบกับเครื่องนับความถี่ทั่วไปให้เป็นเครื่องมือวัดคาบาซิมิตนซ์ได้ด้วย



2.1 การวัดโสมปโดยใช้วงจรกิจฟเพื่อเร็นเซียบ

วิธีนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ซึ่งวงจรกิจฟเพื่อเร็นเซียบจะให้ค่าโสมปที่ถูกคองของสัญญาณเข้าไค้ที่ทุกขณะของเวลา ณ.จุดสัญญาณออก ทั้งแสดงวงจรวไน ภาพที่-2



ภาพที่-2 วงจรกิจฟเพื่อเร็นเซียบ

วงจรประกอบขึ้นด้วย ความต้านทาน R , คาปาซิเตอร์ C และออป-แอมป์ ซึ่งจะทำงานเป็นคิฟเพื่อเร็นเซียบที่สมบูรณ์ ทั้งแสดงไวกามสมการค่อไปนี้

จากคุณสมบัติของ ออป-แอมป์

$$i_i = i_o \quad V_{diff} = 0$$

และสมการกระแสของคาปาซิเตอร์

$$i = C \cdot \frac{dV_c}{dt}$$

จะได้ว่า

$$i_i = i_o = C \frac{dV_i}{dt}$$

และ

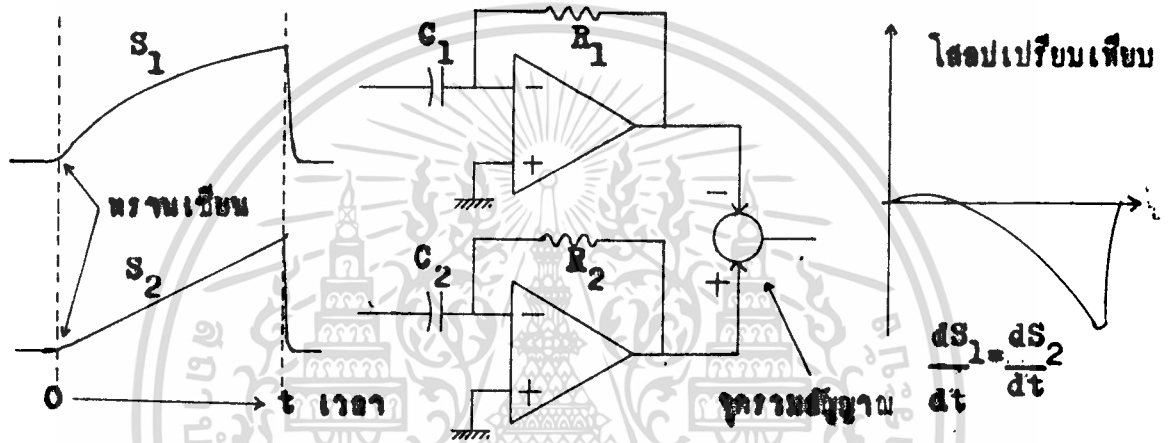
$$V_o = -i_o \cdot R - RC \cdot \frac{dV_i}{dt} \quad 2.1$$

ถ้าให้

$$-RC = 1$$

$$\therefore V_o = \frac{dV_i}{dt} \quad 2.2$$

จะเห็นได้จากสมการ 2.2 ว่า สัญญาณออกเป็นคิฟเฟอเรนเชียลหรือไฮดรอลิก  
 สัญญาณเข้า ส่วนสมการ 2.1 แสดงไว้ว่าวงจรคิฟเฟอเรนเชียลมีค่าจรรยาเป็น  $-RC$   
 วิธีวัดไฮดรอลิกใช้วงจรคิฟเฟอเรนเชียลเป็นวงจรที่ไฮดรอลิกไฮดรอลิกอย่างสมบูรณ์ แต่มี  
 ความไม่เหมาะสมหลายประการในการนำไปใช้เพื่อการเปรียบเทียบไฮดรอล (ภาพที่-3)



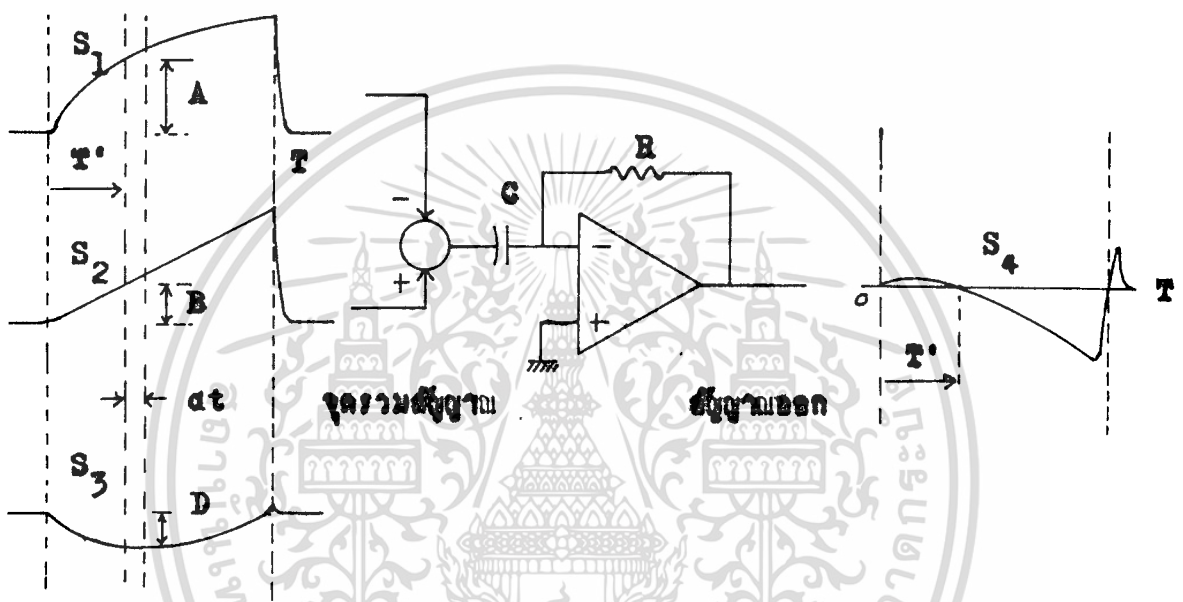
ภาพที่-3 การเปรียบเทียบไฮดรอลิกใช้วงจรคิฟเฟอเรนเชียล

จากภาพที่-3 จะเห็นว่าต้องใช้วงจรคิฟเฟอเรนเชียลถึงสองหน่วยเพื่อการเปรียบเทียบไฮดรอลิก โดยแต่ละหน่วยใช้ไฮดรอลิกไฮดรอลิกของสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกันที่จุดรวมสัญญาณอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะเกิดมีจุดบกพร่องที่ทำให้เกิดการเปรียบเทียบไฮดรอลิกคลาดเคลื่อนได้ยากดังต่อไปนี้

- 2.1.1  $R_1 C_1$  และ  $R_2 C_2$  อาจมีค่าไม่เท่ากัน
- 2.1.2 วงจรเปรียบเทียบไฮดรอลิกที่ทำงานโดยอัตโนมัติ จะไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่า  $R_1 C_1$  และ  $R_2 C_2$  ซึ่งจะต้องปรับค่าให้เหมาะสมกับไฮดรอลิกที่ทำการวัดอยู่ ให้เป็นไปได้อีกโดยค่า  $R_1 C_1$  และ  $R_2 C_2$  เท่ากันตลอดช่วงของการทำงาน
- 2.1.3 วงจรเปรียบเทียบ จะไม่สามารถหาค่าไฮดรอลิกจริง (ค่าทางทฤษฎี) ที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณหรืออย่าง ( $S_1$ ) ได้เนื่องจากทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นเสมอในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.2 การเปรียบเทียบโสมปโคยใช้วงจรคิฟเพื่อเร็นเซียดหน่วยเคียว

วิธีนี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1 และ 2.1.2  
 กังแสดงการทำงานไว้ใน ภาพที่-4



ภาพที่-4 แสดงการทำงานของวงจร เปรียบเทียบโสมปโคยใช้วงจรคิฟเพื่อเร็นเซียดเพียงหน่วยเคียว

สัญญาณตัวอย่าง ( $S_1$ ) และสัญญาณเชิงเส้น ( $S_2$ ) ที่จะนำมาเปรียบเทียบโสมปโคย จะเข้าสู่จกรวมสัญญาณก่อน แล้วจึงผ่านวงจรคิฟเพื่อเร็นเซียด สัญญาณ  $S_3$  ซึ่งเป็นผลจากการรวมทางระดับคิกการะหว่างสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  จะมีโสมปโคยเป็น ศูนย์ ณ เวลา  $T'$  ที่โสมปโคยของสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  เท่ากัน เมื่อสัญญาณ  $S_3$  ผ่านวงจรคิฟเพื่อเร็นเซียดจะโคสัญญาณ  $S_4$  ซึ่งจะผ่านระดับคิกการะหว่างที่เวลา  $T'$  กังแสดงคามสมการ  
 ในช่วงเวลา  $dt$

$$S_1 = A + \frac{dS_1}{dt}$$

$$S_2 = B + \frac{dS_2}{dt}$$

A, B, & D → constants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อเข้าสู่จกรรวมสัญญาณ

$$S_3 = D + \frac{dS_2}{dt} - \frac{dS_1}{dt}$$

และเมื่อผ่านวงจรกึ่งเฟอเฟินเจียอ

$$S_4 = -RC \cdot \frac{dD}{dt} + RC \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{dS_1}{dt} - \frac{dS_2}{dt} \right) \quad 2.3$$

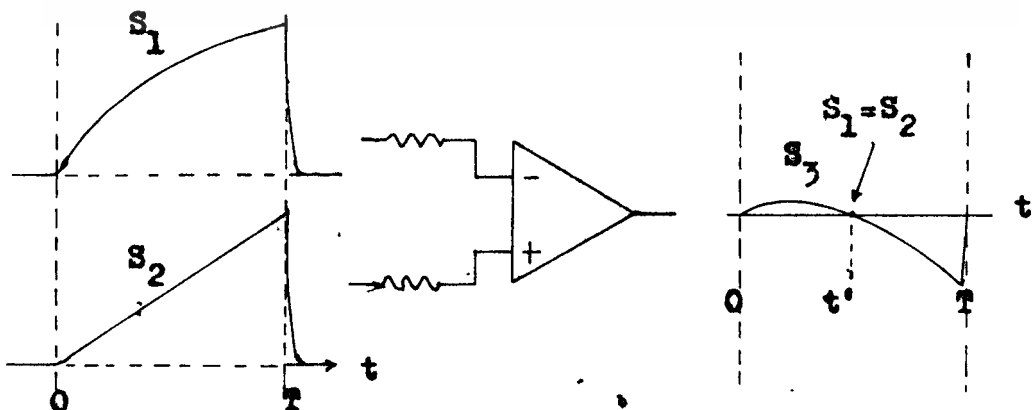
จากสมการ 2.3 สมมุติให้โสดปของสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  มีค่าเท่ากันในช่วงเวลา  $dt$  สมการ 2.3 จะลดลงเป็น

$$S_4 = RC \cdot \frac{d}{dt} (0) = 0 \quad (t = T') \quad 2.4$$

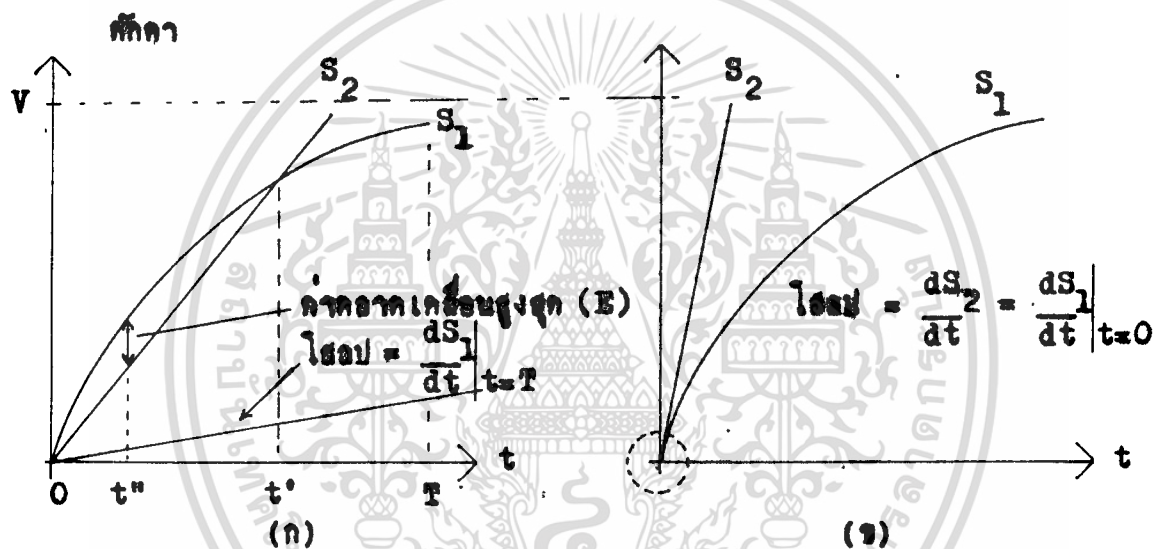
การเปรียบเทียบโสดปโดยวงจรกึ่งเฟอเฟินเจียอหน่วยเคียวนี้ จะสามารถลดปัญหาที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1 และ 2.1.2 ได้ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างวงจรกึ่งเฟอเฟินเจียอที่สามารถปรับค่า RC ได้โดยอัตโนมัติ เพื่อให้เหมาะสมกับโสดปที่ทำการวัด โดยค่า RC ไม่เป็นฟังก์ชันกับสัญญาณเข้าและสัญญาณออกก็ยังคงเป็นไปได้ยาก จึงได้พัฒนาเทคนิคการวัดโสดปขึ้นมาใหม่โดยไม่ใช้วงจรกึ่งเฟอเฟินเจียอ เพื่อให้สามารถสร้างวงจรได้ง่ายและให้ผลการวัดที่ ดีดังเสนอไว้ในหัวข้อ 2.3 และ 2.4

2.3 การเปรียบเทียบโสดปโดยการเปรียบเทียบระดับของสัญญาณโดยตรง

วิธีนี้สัญญาณตัวอย่างและสัญญาณเชิงเส้น จะถูกนำมาเปรียบเทียบกันด้วยวงจรเปรียบเทียบ ดังแสดงในภาพที่-5



จากภาพที่-5 สัญญาณตัวอย่าง  $S_1$  มีโสมปเปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยมีค่าโสมปสูงสุดที่จุดเริ่มต้นและมีค่าโสมปต่ำสุดที่เวลา  $T$  ก่อนที่จะหมดคามของสัญญาณ  $S_1$  และผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ  $S_1$  กับ  $S_2$  (สัญญาณ  $S_3$ ) โดยไขว่จรเปรียบเทียบระดับสัญญาณ แสดงไว้ทางขวามือใน ภาพที่-5 ซึ่งสัญญาณ  $S_3$  จะมีค่าเป็น ศูนย์ เมื่อระดับของสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  เท่ากัน ที่เวลา  $t = t'$



ภาพที่-6 แสดงการเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่าง สัญญาณตัวอย่าง และสัญญาณเชิงเส้น

พิจารณาจาก ภาพที่-6 ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด (E) ที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ  $S_1$  กับ  $S_2$  จะเกิดขึ้นที่เวลา  $t''$  ซึ่งโสมปของสัญญาณ  $S_1$  กับ  $S_2$  มีค่าเท่ากัน และสามารถเขียนสมการแสดงค่าคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบโสมป ด้วยวิธีเปรียบเทียบในเชิงระดับของสัญญาณได้ดังนี้

$$S_1(t) = V \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad 2.5$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = \frac{V}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 2.6$$

ที่เวลา  $t=t''$

$$\left. \frac{dS_1(t)}{dt} \right|_{t=t''} = \frac{V}{\tau} e^{-\frac{t''}{\tau}} \tag{2.7}$$

จากสมการ 2.7 จะได้ว่า

$$S_2(t) = t \cdot \frac{V}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

และ

$$S_2(t)_{t=t''} = t'' \cdot \frac{V}{\tau} e^{-\frac{t''}{\tau}} \tag{2.8}$$

จากสมการ 2.5 และ 2.8 จะสามารถแสดงค่าภาคเคลื่อนที่ได้เป็น

$$E = V \cdot (1 - e^{-\frac{t''}{\tau}}) - t'' \cdot \frac{V}{\tau} e^{-\frac{t''}{\tau}} \tag{2.9}$$

หรือ

$$\frac{E}{V} = 1 - (1 + \frac{t''}{\tau}) \cdot e^{-\frac{t''}{\tau}} \tag{2.10}$$

ในกรณีที่ใช้ ออป-แอมป์ เป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยสมมุติให้ ออป-แอมป์ มีค่าส่งขยายวงจรมหัพ (open loop gain) เป็น  $10^6$  เท่า จะได้ว่า

2.3.1 สัญญาณเขาคิฟเพื่อเฟ้นเชียด = E

2.3.2 คารอง  $E/V \approx 10^6$

แทนค่า  $E/V = 10^6$  ในสมการ 2.10 และใช้วิธี สุ่มตัวเลข หากค่า  $t''/\tau$  จะได้อ่า  $t''/\tau \approx 0.001$  จากนั้นแทนค่า  $t''/\tau = 0.001$  และ  $t/\tau = 0.0$  ลงในสมการ 2.6 จะได้ว่า

โสดปที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณตัวอย่าง  $S_1 = \frac{V}{\tau}$   
 โสดปของสัญญาณเชิงเส้น  $S_2$  เมื่อค่า  $t''/\tau \approx 0.001 = 0.9990005 \cdot \frac{V}{\tau}$

นั่นคือ โสดปของสัญญาณเชิงเส้นที่ได้จากการ เปรียบเทียบนี้ จะมีค่าภาคเคลื่อนไปจากโสดปที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณตัวอย่างเป็น

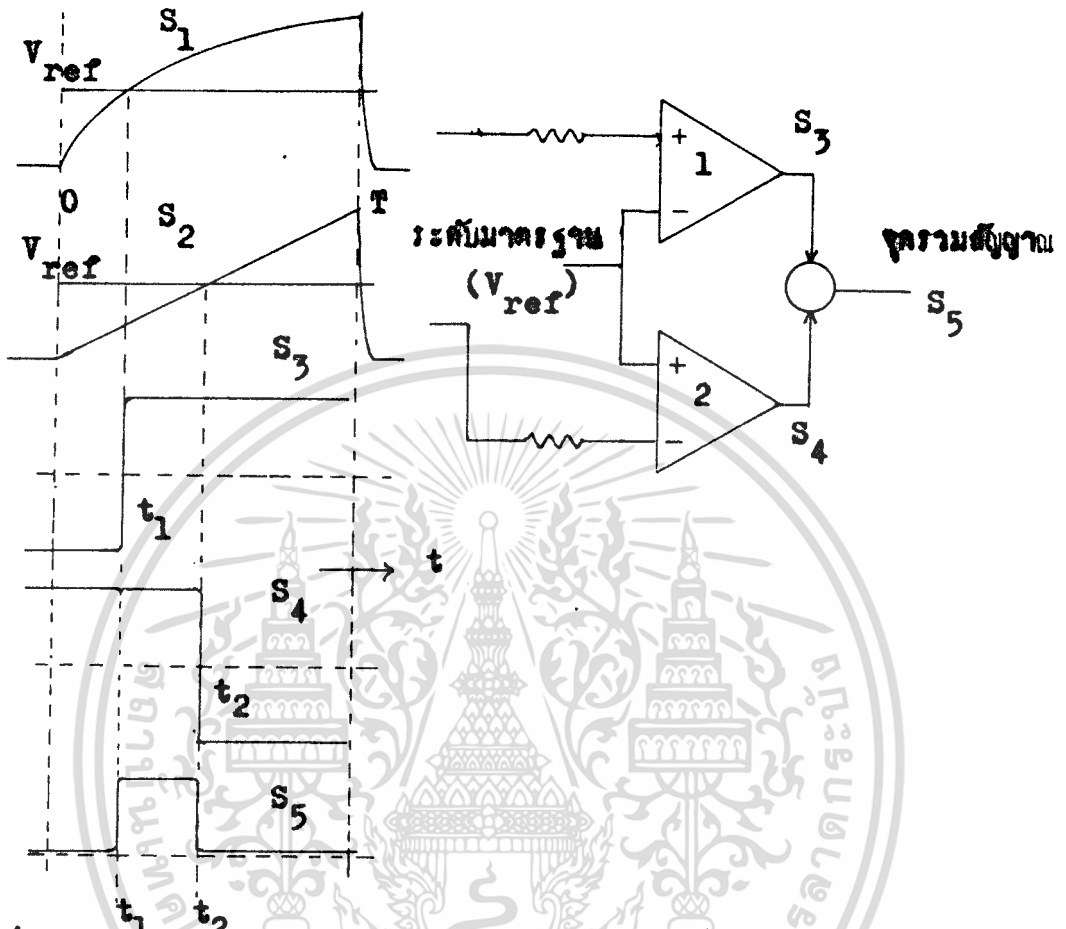
$$\text{โลสปคคาคเคลื่อน} = \frac{\frac{V}{Z} - \frac{V}{Z} \cdot e^{-\frac{r}{Z}}}{\frac{V}{Z}} \times 100$$

$$\text{ค่าโลสปคคาคเคลื่อนไป} = (1 - 0.9990005) \times 100 = 0.09995 \%$$

จากสมการ 2.11 แสดงให้เห็นว่าผลการเปรียบเทียบโลสปมีค่าคคาคเคลื่อนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ทราบเชียน ที่จุดเริ่มต้นของสัญญาที่นำมาเปรียบเทียบกัน และ ออฟเซ็ท ของระดับศักราสนัย ของสัญญาทั้งสองอาจไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดค่าคคาคเคลื่อนได้ 5% ถึง 10% ซึ่งการชกเชยคคาคเคลื่อนจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น ทำให้ยาก เนื่องจากค่าคคาคเคลื่อนไม่ได้เป็นค่าคงที่ที่สามารถคำนวณได้ง่ายสำหรับวงจรใดๆ จึงได้พัฒนาวิธีการ เปรียบเทียบขึ้นอีกวิธีหนึ่งดังแสดงไว้ในหัวข้อ 2.4

#### 2.4 เปรียบเทียบโลสปโดยการเปรียบเทียบระดับสัญญา ณ ระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน

เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากทราบเชียน และ ออฟเซ็ท ของระดับศักราสนัย ซึ่งทำให้ผลการเปรียบเทียบโลสปคคาคเคลื่อน แต่ยังคงวิธีการ เปรียบเทียบระดับสัญญาไว้ เพื่อให้การประกอบวงจรยังคงทำได้ง่าย จึงได้เพิ่มระดับเปรียบเทียบมาตรฐานขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง ระดับเปรียบเทียบมาตรฐานจะมีระดับศักรสูงกว่าระดับ ออฟเซ็ท และทราบเชียน มาก สัญญาตัวอย่างและสัญญาเชิงเส้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบ กับ ระดับศักราสมาตรฐานแทนที่จะเปรียบเทียบกันโดยตรง จึงทำให้สามารถลดคคาคเคลื่อนลงได้ ตามสัดส่วนการเปรียบเทียบระดับระหว่าง ระดับออฟเซ็ท และ ทราบเชียน ณ ระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน ดังแสดงผังการทำงานไว้ใน ภาพที่-7



ภาพที่-7 แสดงการทำงานของวงจรเปรียบเทียบระดับดู เปรียบเทียบระดับกับระดับมาตรฐาน

จาก ภาพที่-7 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ระดับมาตรฐานระดับเดียวกัน โดยใช้ออป แอมป์ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อสัญญาณ  $S_1$  มากกว่าระดับมาตรฐาน ( ณ.เวลา  $t_1$  ) สัญญาณออกของ ออป-แอมป์ 1 (  $S_3$  ) จะเปลี่ยนจากศักดา วม เป็น นวก ในทำนองเดียวกันสัญญาณออกของ ออป-แอมป์ 2 (  $S_4$  ) จะเปลี่ยนจากศักดา นวก เป็น วม ( ณ.เวลา  $t_2$  ) เมื่อสัญญาณ  $S_2$  มากกว่าระดับมาตรฐาน เมื่อนำสัญญาณ  $S_3$  และ  $S_4$  มารวมกันที่จุดรวมสัญญาณจะได้สัญญาณ ไทรสภาวะ ( tristate ) ดังนี้

กรณี เปรียบเทียบ

$$S_1 \ \& \ S_2 < V_{ref}$$

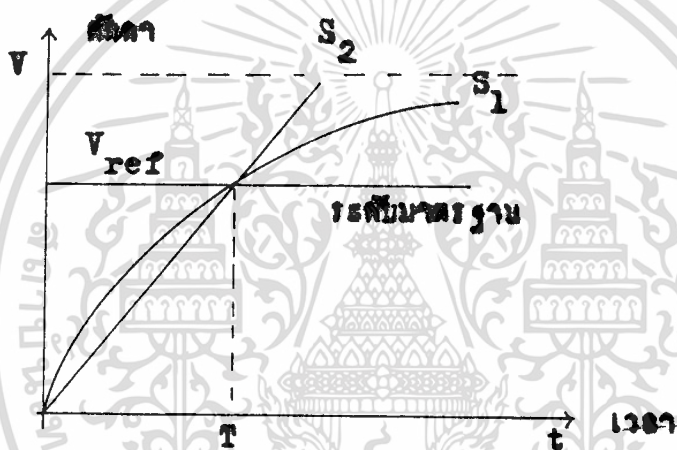
สภาวะ

ไตรสภาวะ

$$S_1 \ \& \ S_2 > V_{ref}$$

ไตรสภาวะ

สามารถสรุปได้จาก 2.12 คือ วงจรเปรียบเทียบคู่กันแสดงใน ภาพที่-7 จะบอกได้  
ว่า สัญญา  $S_1$  และ  $S_2$  สัญญาณใดเข้าสู่ระดับมาตรฐานที่กำหนดไว้ก่อน หรือพร้อมกัน  
( สภาวะบวก, สภาวะลบ ) สัญญาณใดจากการเปรียบเทียบซึ่งเป็นไตรสภาวะสามารถนำ  
ไปใช้ควบคุมวงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้น (  $S_2$  ) ให้เข้าสู่ระดับมาตรฐานพร้อมกันสัญญาณ  
ตัวอย่าง (  $S_1$  ) ได้ ในกรณี นี้แสดงค่าโสหุ่ยของสัญญาณเชิงเส้นใดดังนี้



ภาพที่-8 แสดงสภาวะเมื่อสัญญาณตัวอย่างและสัญญาณเชิงเส้นเข้าสู่ระดับ  
มาตรฐานพร้อมกัน

จาก สมการ 1.1

$$\left. \frac{dS_1}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V}{T} \quad 2.13$$

จาก ภาพที่-8

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{V_{ref}}{T} \quad 2.14$$

$$S_1(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$V_{\text{ref}} = V(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})$$

$$e^{-\frac{T}{\tau}} = 1 - \frac{V_{\text{ref}}}{V}$$

$$T = -\tau \ln\left(1 - \frac{V_{\text{ref}}}{V}\right) \quad 2.15$$

แทนค่า สมการ 2.15 ใน สมการ 2.14

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{V_{\text{ref}}}{-\tau \ln(1 - \frac{V_{\text{ref}}}{V})}$$

จะได้ค่าคงตัวชดเชย (K) สำหรับไฮดรอลิกเริ่มคนเป็น

$$K = \frac{\frac{dS_1}{dt} \Big|_{t=0}}{\frac{dS_2}{dt}} = -\frac{V}{V_{\text{ref}}} \cdot \ln\left(1 - \frac{V_{\text{ref}}}{V}\right) \quad 2.16$$

ในกรณี ที่ต้องการค่าคงตัวชดเชยเพื่อหาไฮดรอลิกอื่นๆ (t = 0) ก็เพียงทดแทนลงใน สมการ 2.16 โดยเปลี่ยนเทอมเศษใหม่เป็น

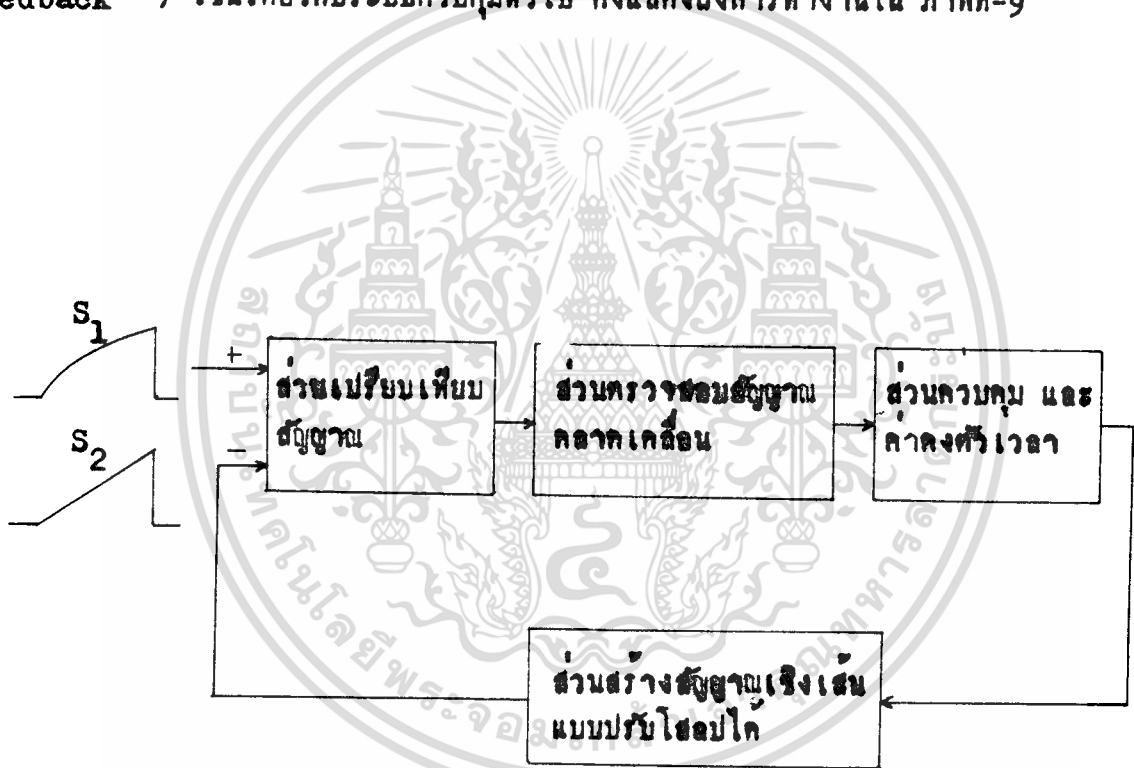
$$K_{t=T} = \frac{\frac{dS_1}{dt} \Big|_{t=T}}{\frac{dS_2}{dt}} \quad 2.17$$

สมการ 2.17 เป็นสมการทั่วไปสำหรับหาค่าคงตัวชดเชย เพื่อนำไปคูณกับสัญญาณเชิงเส้นที่ได้จากการเปรียบเทียบให้ได้เป็นสัญญาณเชิงเส้นใหม่ที่มีค่าไฮดรอลิกตามที่ต้องการ.

### บทที่ 3 ระบบควบคุมไฮดรอลิก

#### 3.1 ระบบควบคุม

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วใน บทที่ 1 ที่จะได้ทำการวัดไฮดรอลิกของสัญญาณตัวอย่าง ณ จุดที่ต้องการ โดยสร้างสัญญาณเชิงเส้นขึ้นมาเพื่อเป็นสัญญาณตัวแทน จึงจำเป็นต้องมีวงจรควบคุมอัตโนมัติมาควบคุมวงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้น ให้มีค่าไฮดรอลิกตรงกับค่าที่ต้องการ สำหรับการทํางานของระบบควบคุมที่ใช้ เป็นแบบป้อนกลับเพื่อชดเชยในทางลบ (negative feedback ) เช่นเดียวกับระบบควบคุมทั่วไป จึงแสดงผังการทํางานใน ภาพที่-9



ภาพที่-9 ผังการควบคุมไฮดรอลิกของสัญญาณเชิงเส้นแบบอัตโนมัติ

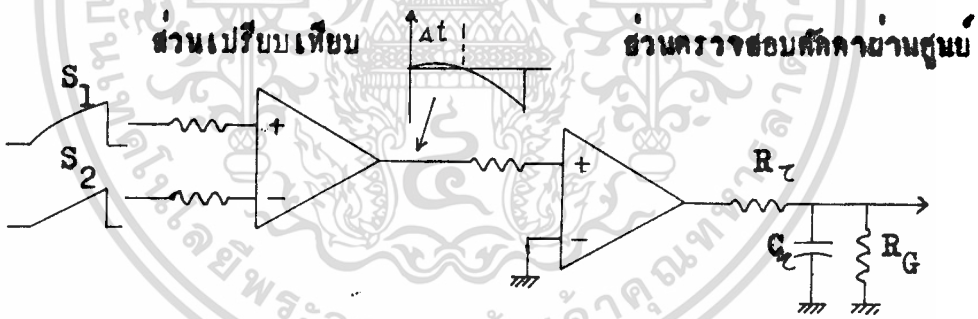
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ส่วนเปรียบเทียบ จะเป็นวงจรเปรียบเทียบโวลต์แบบโคกโก้ แต่จากการเปรียบเทียบ จะผ่านเข้าสู่ ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งจะแปลงสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบให้เป็นระดับศักย์คาบที่แปรตามค่าโวลต์คลาดเคลื่อน แล้วจึงนำสัญญาณออกจาก ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน ไปควบคุม วงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้นอีกทอดหนึ่ง

3.2 ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน

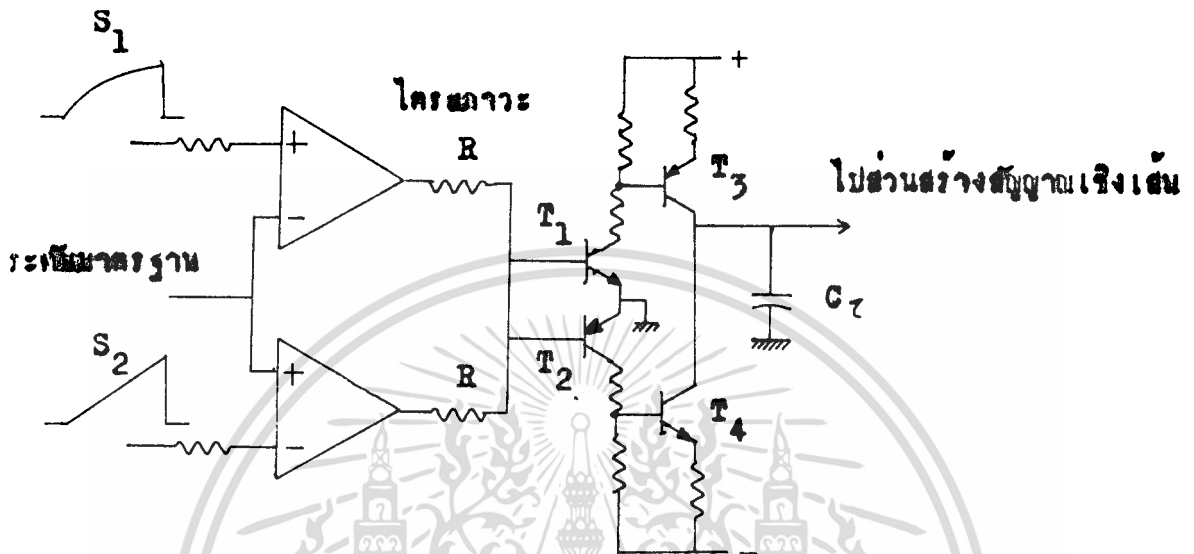
3.2.1 ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการเปรียบเทียบระดับโดยตรง

พิจารณาจาก ภาพที่-6 ข และสมการ 2.10 จะเห็นได้ว่าค่า  $E$  ควรมีค่าต่ำมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบ ( $S_3$ ) ควรมีค่าศักย์ความวอกปรกฏน้อยที่สุด นับแต่เวลา  $t=0$  จึงใช้วงจรตรวจสอบระดับศักย์คาบผ่านศูนย์คือไวที่จุดสัญญาณออกของส่วนเปรียบเทียบทั้งแสดงไว้ใน ภาพที่-10



ภาพที่-10 ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการเปรียบเทียบระดับโดยตรง สัญญาณออกของวงจรตรวจสอบระดับศักย์คาบผ่านศูนย์จะเปลี่ยนระดับอย่างรวดเร็ว มีสองสถานะคือเป็นระดับศักย์อิมพัลส์ บวก หรือ ลบ จึงจำเป็นต้องหน่วงการเปลี่ยนระดับให้ช้าลงโดยใช้  $R_\tau$  และ  $C_\tau$  ( $\tau = R_\tau C_\tau$ ) ซึ่งค่า  $\tau$  จะต้องมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับคาบของสัญญาณเชิงเส้นที่ถูกควบคุม ส่วน  $R_G$  ใส่ไว้เพื่อให้ค่าโวลต์ของสัญญาณเชิงเส้นที่ทำการควบคุมอยู่เข้าสู่ค่าสมดุล ( equilibrium ) ไม่เพียงเบมมากเกินสมควร ( overshoot )

### 3.2.2 ส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการเปรียบเทียบระดับ กับ ระดับมาตรฐาน

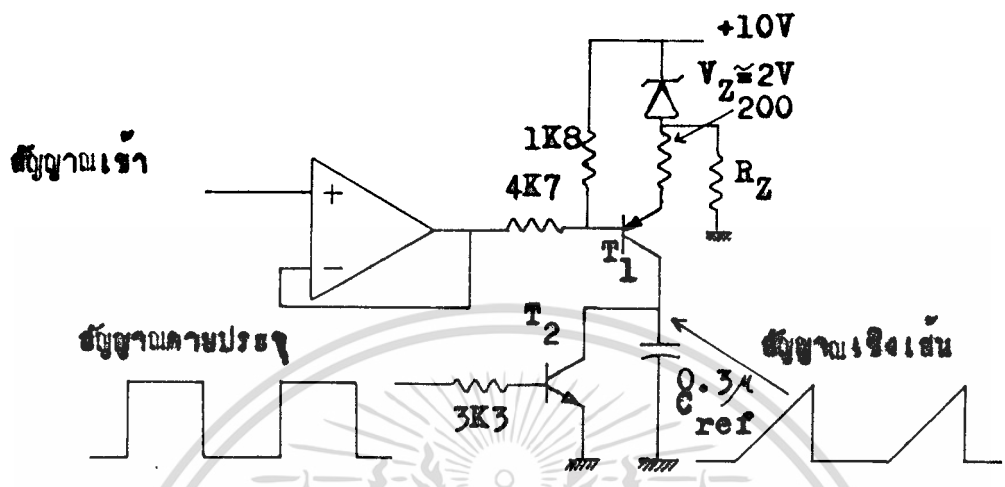


ภาพที่-12 แสดงส่วนตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการเปรียบเทียบระดับ กับ ระดับมาตรฐาน

ทั้งที่ได้อธิบายมาแล้วใน หัวข้อ 2.4 สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ  $S_1$  และ  $S_2$  กับ ระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน จะเป็นสัญญาณโครสภาวะ ซึ่งนำมาใช้ควบคุมทรานซิสเตอร์  $T_1, T_2, T_3$  และ  $T_4$  ดังแสดงไว้ใน ภาพที่-12 โดยทรานซิสเตอร์  $T_3, T_4$  เป็นส่วนจ่ายกระแสตรงคงตัว บวก และ ลบ ตามลำดับ ทรานซิสเตอร์  $T_1, T_2$  ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมการจ่ายกระแสของทรานซิสเตอร์  $T_3, T_4$  ตามลำดับ สัญญาณโครสภาวะจากส่วนเปรียบเทียบจะทำให้ทรานซิสเตอร์  $T_3, T_4$  ผลักกันจ่ายกระแสให้กับ  $C_c$  กระแสที่จ่ายจากทรานซิสเตอร์  $T_3, T_4$  จะถูกแปลงเป็นศักย์คาตรงคกครวม  $C_c$  ซึ่งใช้ควบคุมวงจรมีสร้างสัญญาณเชิงเส้นได้

### 3.3 วงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้น

สัญญาณเชิงเส้นที่ใช้ในวงจรมีสร้างสัญญาณสัมพันธ์นี้ ใช้วิธีจ่ายกระแสตรงให้กับคาปาซิเตอร์ ซึ่งจะให้ศักย์คาตรอมคาปาซิเตอร์แปร โดยตรงกับเวลา ดังแสดงวงจรมีใน ภาพที่-13

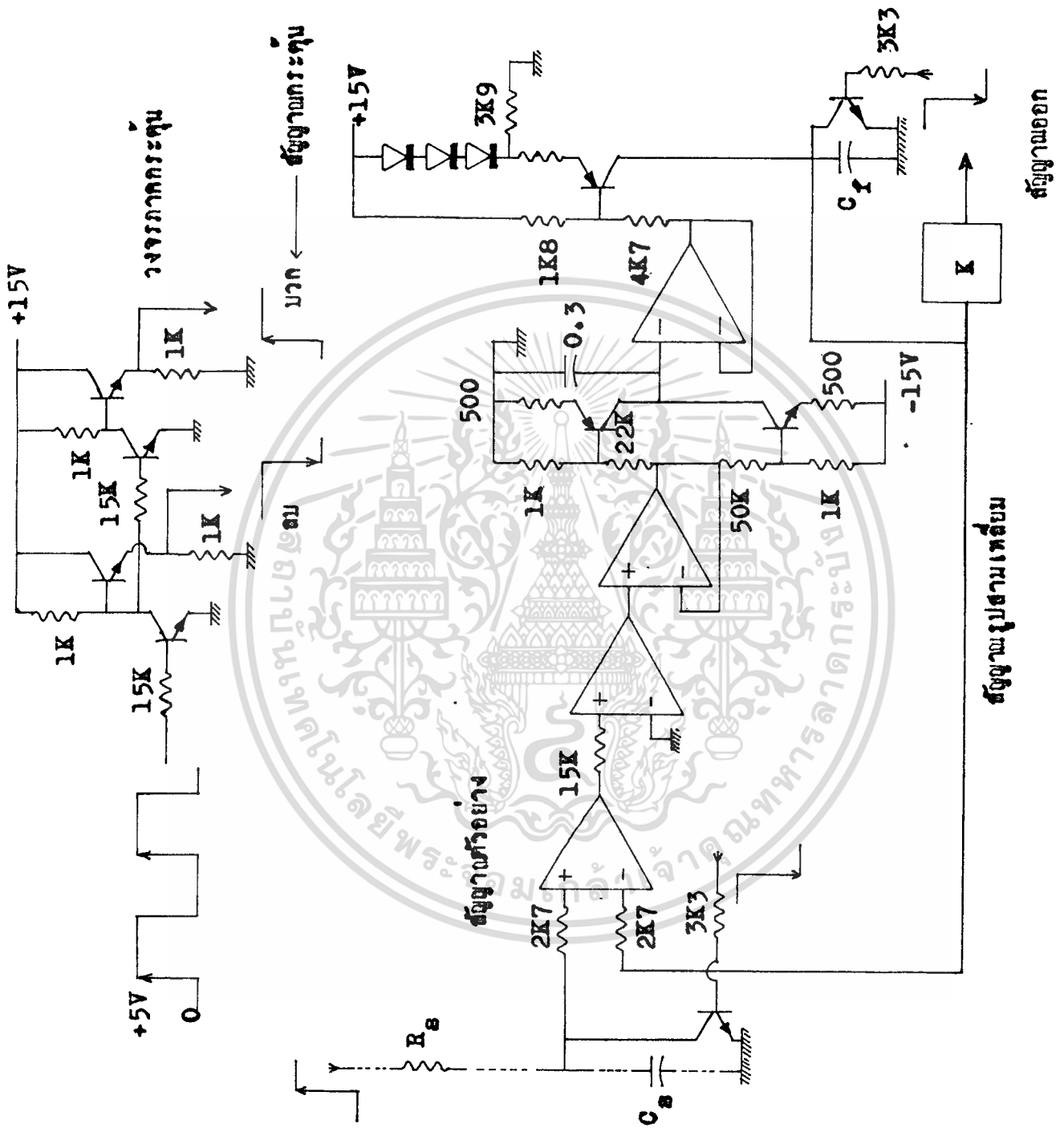


ภาพที่-13 วงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้นชนิดแปรค่าโสมปโก้

ทรานซิสเตอร์  $T_1$  จ่ายกระแสคงตัวให้กับ  $C_{ref}$  เพื่อให้ศักดาคร่อม  $C_{ref}$  แปรเป็นสัญญาณเชิงเส้น เมื่อระดับของสัญญาณเชิงเส้นสูงพอควร  $C_{ref}$  จะถูกสัทวงจร โดย  $T_2$  เพื่อให้ระดับศักดาตกกลับลงสู่ศูนย์ และเมื่อทรานซิสเตอร์  $T_2$  เปิดวงจรก็จะเป็นการเริ่มต้นคาบต่อไปของสัญญาณเชิงเส้น จะสังเกตได้ว่าแรงดันไบอัสของทรานซิสเตอร์  $T_1$  ควบคุมได้จากจุดสัญญาณเข้า ซึ่งแรงดันไบอัสนี้สามารถควบคุมค่ากระแสตรงที่ทรานซิสเตอร์  $T_1$  จ่ายให้กับ  $C_{ref}$  ได้ จึงทำให้วงจรใน ภาพที่-13 เป็นวงจรสร้างสัญญาณเชิงเส้นที่ควบคุมโสมปโก้จากศักดาที่จุดสัญญาณเข้า

บทที่ 4วงจร และ ผลการทดลอง

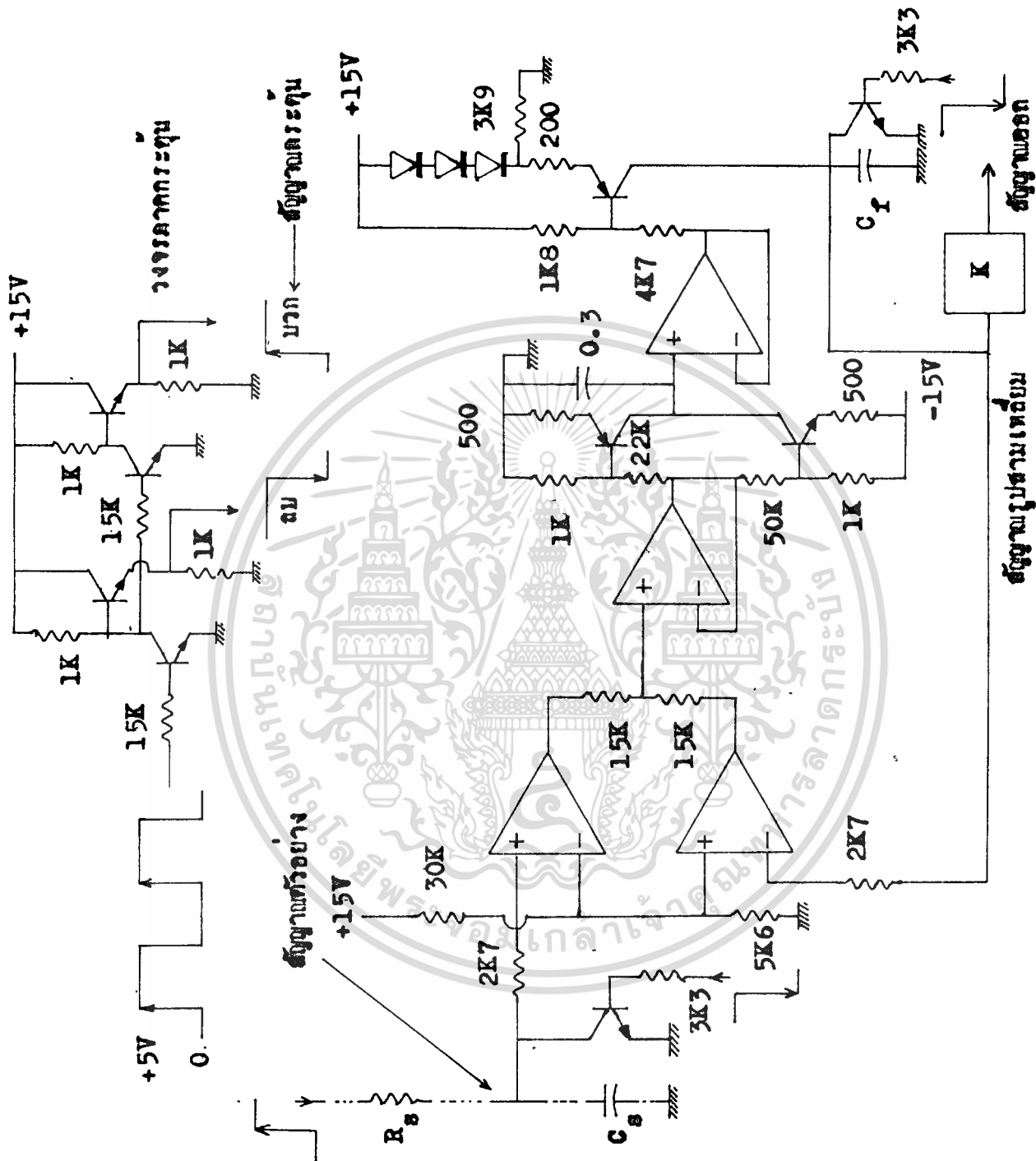
- 4.1 ในบทนี้จะได้แสดงวงจร และ เปรียบเทียบผลการวัดโวลต์ระหว่าง วงจรสร้างสัญญาณ สัมผัสที่ใช้ส่วนเปรียบเทียบโวลต์แบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง กับ แบบที่ใช้ การเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับมาตรฐาน ซึ่งการวัดผลนี้ใช้ ออสซิลอโสกอป เพียง เครื่องเดียวทำการวัดทั้งโวลต์ของสัญญาณตัวอย่าง และ โวลต์ของสัญญาณเชิงเส้น ที่สร้างขึ้น โดยการวัดโวลต์เพื่อเปรียบเทียบจะทำการวัดที่ ความไว และ ฐานของ เวลา เกี่ยวกันเสมอ ผลการทดลองที่แสดงไว้ในบทนี้ทั้งหมดจึงเป็นผลการเปรียบเทียบเท่านั้น
- 4.2 วงจร โดยละเอียด ของวงจรสร้างสัญญาณสัมผัสที่ใช้ส่วนเปรียบเทียบโวลต์แบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง แสดงไว้ใน ภาพที่-14 และ แบบที่ใช้ส่วนเปรียบเทียบแบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน แสดงไว้ใน ภาพที่-15 ผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาพที่-16



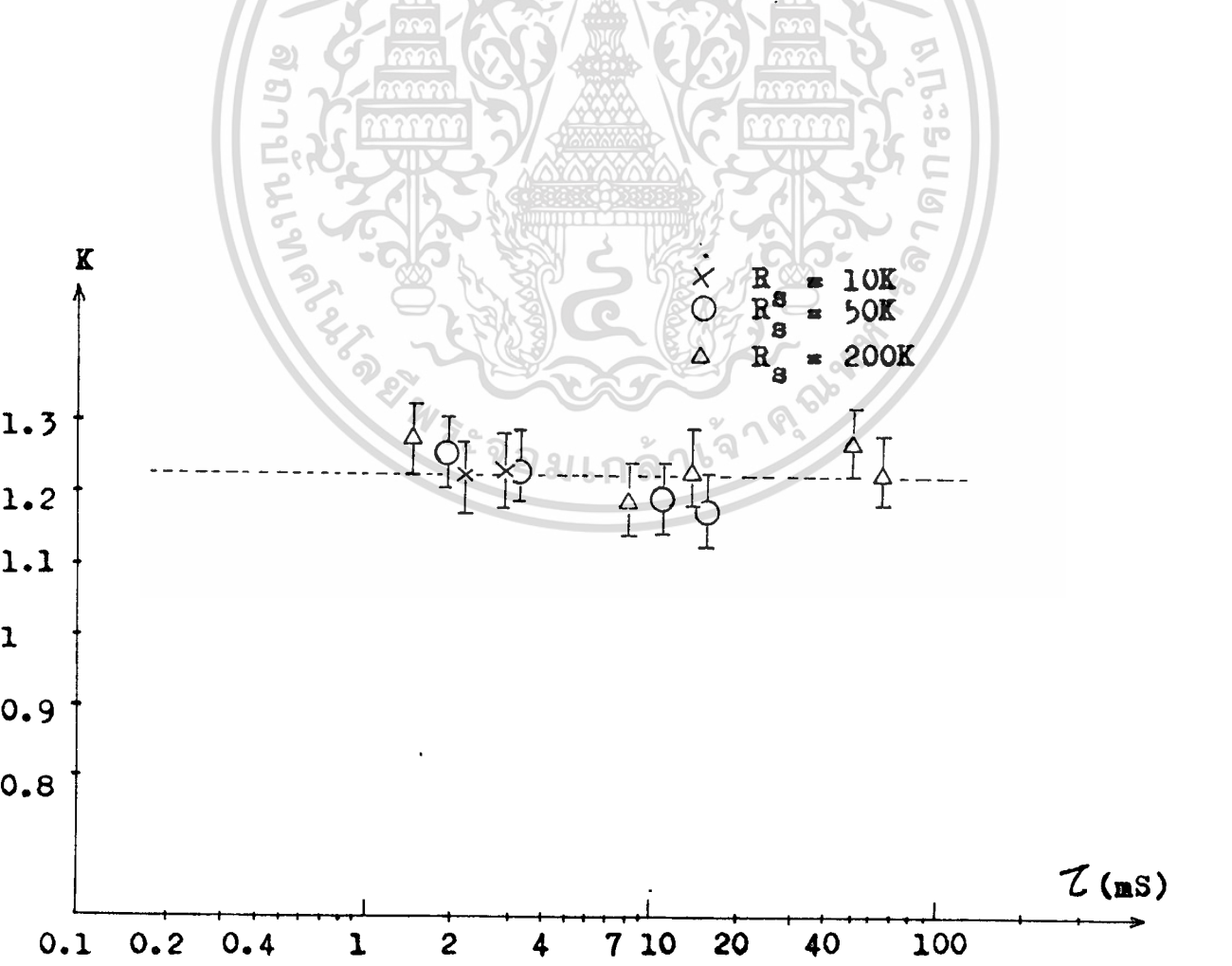
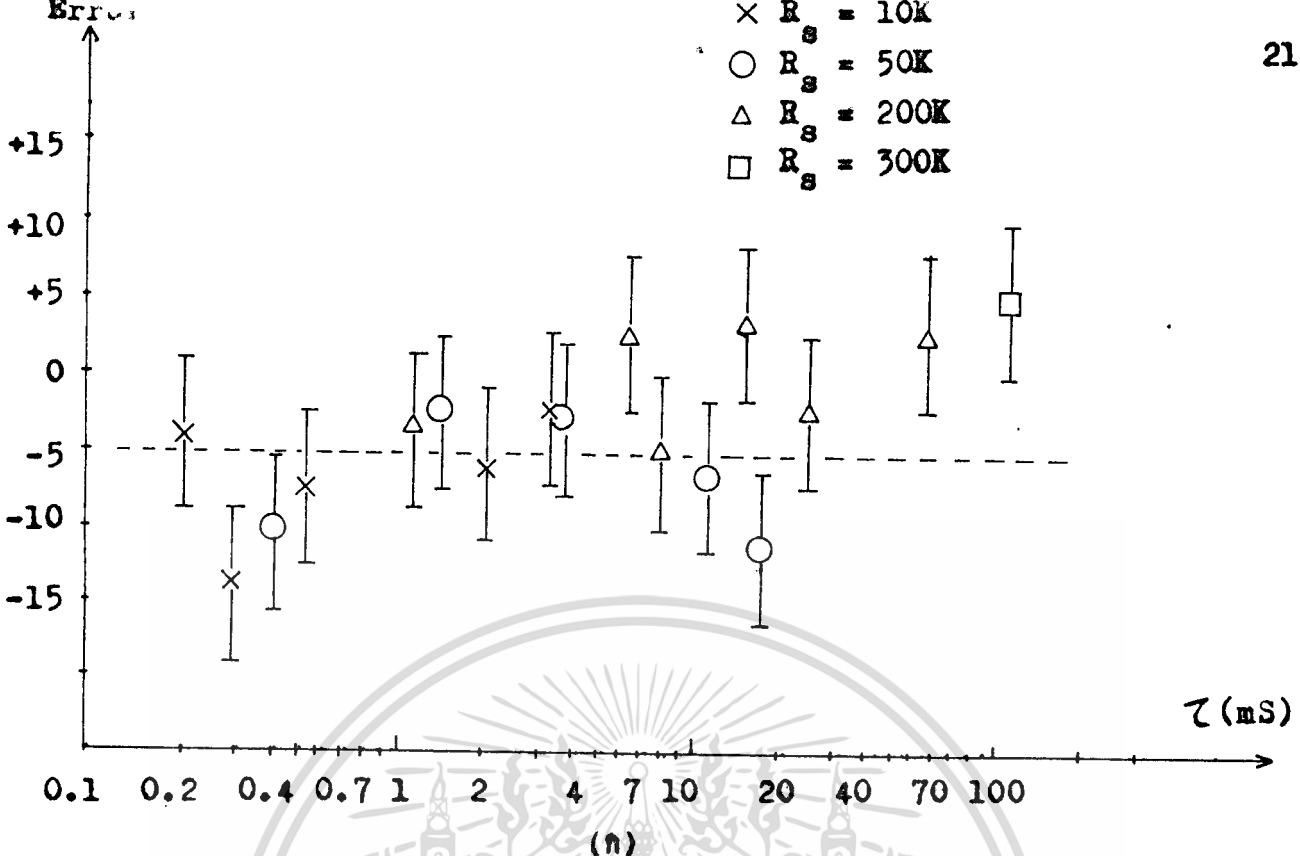
ภาพที่-14

แสดงวงจรควบคุมโสลป ใช้ส่วนเปรียบเทียบแบบเปรียบเทียบ  
ระกับสัญญาณโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ภาพที่-15 แสดงวงจรควบคุมโสตปล ใช้ส่วนเปรียบเทียบแบบเปรียบเทียบ ระบุสัญญาณกับระดับมาตรฐาน .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ภาพที่-16 ตั้งสัน แสดงผลการทดสอบ วงจรควบคุมไดโอด ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

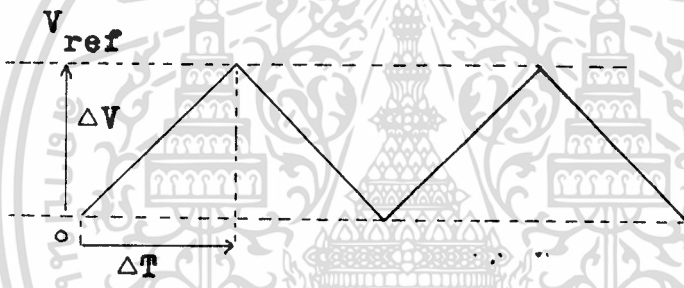
- 4.3 จากภาพแสดงผลการทดลองใน ภาพที่-16 จะเห็นได้ว่าการทดลองกระทำในช่วง คากงตัวเวลาของสัญญาณตัวอย่าง ( $S_N$ ) จาก 0.2 ถึง 100 ของหนึ่งใน พันวินาที และยังโคเลอกราคา  $R_N$  ต่างๆกันเพื่อให้สามารถพิจารณาผลที่เกิด จาก ทรานเซียน และ ออฟเซ็ทของระดับคักกาสุญย์ได้

จาก ภาพที่-16 ก ซึ่งเป็นผลการวัดจากวงจรสร้างสัญญาณสัมพันธ์ที่มีส่วนเปรียบ เทียบโสอบเป็นแบบเปรียบเทียบระดับโดยตรง แสดงคากลาคเคลื่อนโสอบทั้ง แต่ -15 % จนถึง + 5 % และมีแนวโน้มที่คากลาคเคลื่อนโสอบเปลี่ยนไปอย่าง ฉะเนียบกับคากงตัวเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากกลุ่มของข้อมูลที่ได้มาจากคาก  $R_N$  ที่แตกต่างกันในช่วงของคากงตัวเวลาที่ใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าข้อมูลที่ โคจากคาก  $R_N$  สูงจะมีค่าโสอบคากเคลื่อนส่วนใหญ่อันไปทางบวก (โสอบ ของสัญญาณเชิง เสนมากกว่าโสอบของสัญญาณตัวอย่าง) ส่วนข้อมูลที่โคจากคาก  $R_N$  ที่ต่ำลงมาจะให้คากลาคเคลื่อนต่ำลงมา แสดงให้เห็นว่าคากลาคเคลื่อนโสอบ แปรเปลี่ยนไปได้ ตามการแปร เปลี่ยนไปของ ทรานเซียน และ ออฟเซ็ทของระดับ คักกาสุญย์ อันเนื่องมาจากการแปร เปลี่ยนไปของคากงตัวต่างๆ

ใน ภาพที่-16 ข ซึ่งเป็นผลการทดลองวัดจากวงจรสร้างสัญญาณเชิง เส้นที่ใช้ ส่วนเปรียบเทียบโสอบแบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน เห็นได้ว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกันดีโดยมีคากลาคเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ -5 % ถึง +5 % และข้อมูลที่โคจากการใช้คาก  $R_N$  ที่แตกต่างกันก็ไม่แตกออกจากกันจนเป็นที่น่าสังเกต โดยเหตุนี้จึงได้พัฒนา วงจรแปลงโสอบเป็นความถี่ขึ้น เพื่อให้สามารถทดสอบ การทำงานโดยละเอียดของวงจร เปรียบเทียบโสอบแบบนี้ได้โดยการ ใช้ เครื่อง ับความถี่วัดคักสแทนการใช้ ออสซิลโสอบ

บทที่ 5  
วงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่

5.1 เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แน่นอนกว่าที่แสดงไว้แล้วใน บทที่-4 และแสดงการใช้ประโยชน์ของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม จึงได้พัฒนาวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่สัญญาณขึ้น โดยใช้ส่วนเปรียบเทียบโวลต์แบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐานกับการแปลงโวลต์เป็นความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ถูกกำหนดระดับสูงสุดและต่ำสุดไว้แน่นอน สาเหตุที่เลือกวัดความถี่จากการแปลงโวลต์เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมแทนที่จะทำการวัดจากสัญญาณรูปอื่นๆ เช่น สัญญาณเชิงเส้น หรือ สัญญาณจตุรัสการประจุและคายประจุของวงจร RC เนื่องจากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมแปร โวลต์อย่างดีเนี่ยรกับความถี่ และยังให้ผลการแปลงที่แน่นอนในทุกสภาวะของสัญญาณด้วย (มีผลจากทรานเซียนนอย) จึงแสดงสมการของการแปลงโวลต์เป็นความถี่ได้ดังนี้



ภาพที่-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมกับความถี่

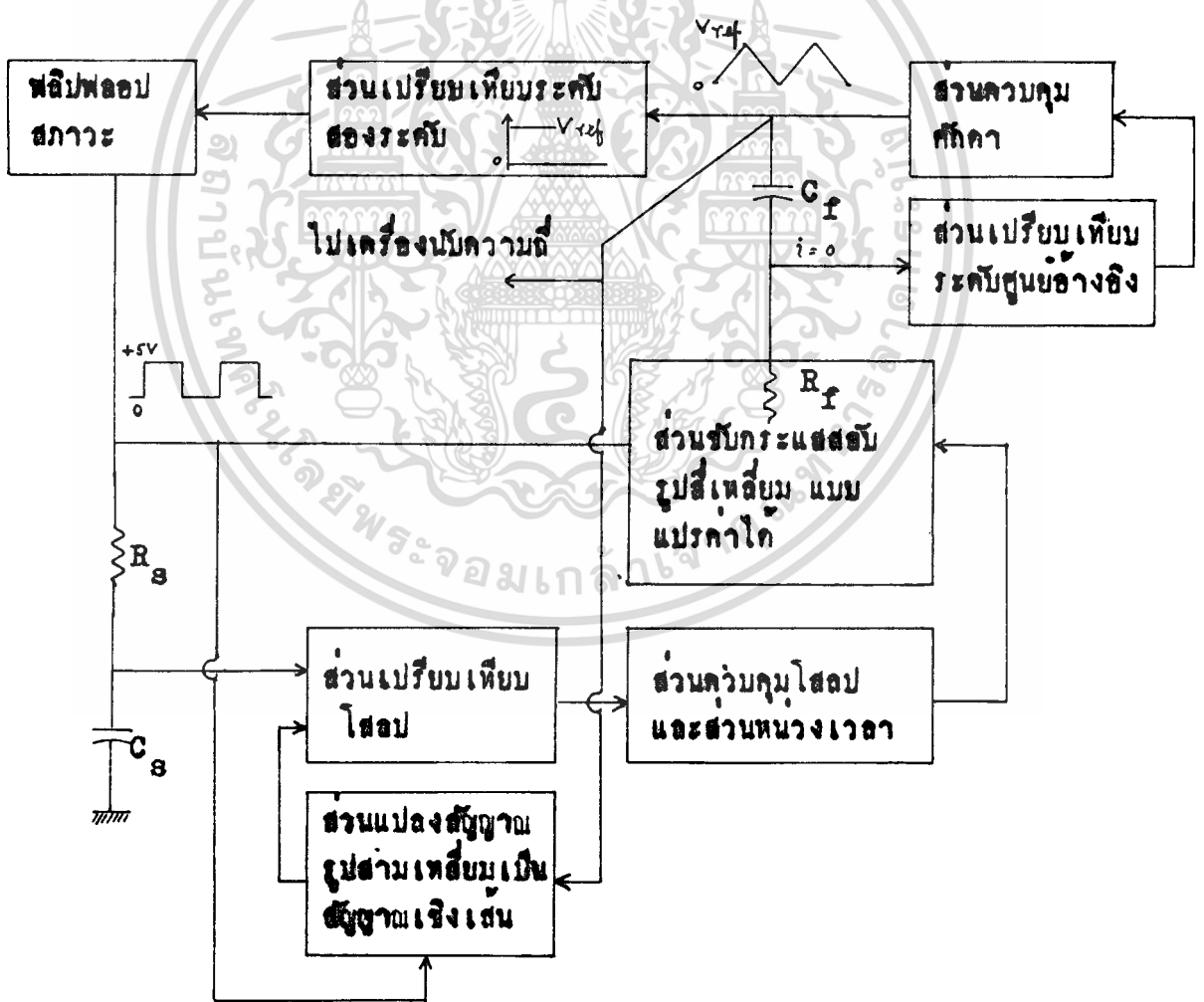
$$\text{โวลต์} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{\text{ref}}}{\Delta T}$$

$$\text{ความถี่} = \frac{1}{2\Delta T} = f$$

$$\text{โวลต์} = \frac{V_{\text{ref}}}{1/2f} = 2 \cdot f \cdot V_{\text{ref}} \quad 5.1$$

5.2 การทำงาน

ภาพที่-18 แสดงผังการทำงานโดยละเอียดของวงจรแปลงโสภาพเป็นความถี่สัญญาณตัวอย่าง เริ่มต้นจากการรับ RC ภายสัญญาณเปลี่ยนระดับทันทีจาก ฟลิปฟลอป ส่วนวงจรภายในจะสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมขึ้นมา แลวนำมาแปลงเป็นสัญญาณเชิงเส้น เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณตัวอย่าง จึงเกิดเป็นวงรอบของการควบคุมโสภาพของสัญญาณเชิงเส้นให้เท่ากับโสภาพของสัญญาณตัวอย่าง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจะแปรกับค่าโสภาพของสัญญาณตัวอย่างซึ่งจะสามารถใช้เครื่องนับความถี่ตรวจสอบได้



ภาพที่-18 ผังการทำงานของวงจรแปลงโสภาพเป็นความถี่สัญญาณ

### 5.2.1 สัญญาณรูปสามเหลี่ยม

โดยใช้การขึ้นกระแสรูปสี่เหลี่ยมเข้าสู่คาปาซิเตอร์กิ่งแสดงใน ภาพที่-18  $C_F$  เป็นคาปาซิเตอร์อ้างอิงซึ่งถูกขั้วจากส่วนขั้วกระแสดรูปสี่เหลี่ยม ศักคาคร่อม  $C_F$  จะเปลี่ยนแปลงตามการขึ้นของกระแสรูปสี่เหลี่ยมอย่างฉับพลันจึงได้เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีโสอบแน่นอน

### 5.2.2 สภาวะ (states)

การสลับสภาวะของส่วนขั้วกระแสดรูปสี่เหลี่ยม ขึ้นอยู่กับระดับสูงสุด และระดับต่ำสุดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่กำหนดไว้ โดยใช้ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณสองระดับ และ ฟลิปฟลอป กล่าวคือสัญญาณออกของ ฟลิปฟลอป จะเปลี่ยนสภาวะตามสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเมื่อสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดและตกลงสู่ระดับต่ำสุดที่กำหนดไว้ ซึ่งสัญญาณออกจาก ฟลิปฟลอป นี้จะใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงที่ควบคุมสภาวะการทำงานทั้งหมดของวงจร

### 5.2.3 เปรียบเทียบโสอบ

สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณเชิงเส้นด้วยวิธี สวิตชิง ที่รับการควบคุมจากสัญญาณสภาวะ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากการขึ้น  $R_{01}$ ,  $C_{01}$  ทั่วสัญญาณเปลี่ยนระดับทันที (สัญญาณสภาวะ) โดยใช้ส่วนเปรียบเทียบแบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน

### 5.2.4 ควบคุมโสอบ

สัญญาณค่าคาชอคเคลื่อนโสอบที่ได้จากส่วนเปรียบเทียบโสอบ จะผ่านเข้าสู่ส่วนแปลงการควบคุมเพื่อเปลี่ยนให้เป็นระดับศักคาตรงไปควบคุมขนาดของกระแสดที่ส่วนจ่ายกระแสดรูปสี่เหลี่ยมจ่ายให้กับ คาปาซิเตอร์ อ้างอิง ซึ่งจะเปลี่ยนค่าโสอบหรือความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้ถูกต้องได้

### 5.3 ผลการทดสอบ

สำหรับการทดสอบวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่ที่แสดงแผนผังไว้ใน ภาพที่-18 นี้ ได้ทำการทดสอบกับส่วนเปรียบเทียบโวลต์เพียงสองแบบเท่านั้นคือ แบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง กับแบบเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน สาเหตุที่ไม่ทดสอบกับส่วนเปรียบเทียบแบบวงจรกิจฟเฟอเรนเชียล เนื่องจากวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่นี้ได้รับการออกแบบให้มีความสามารถในการ เปลี่ยนสถานะของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผลการแปลงความถี่จากโวลต์มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุด จึงทำให้มีสัญญาณรูปปลายแหลม (sharp spikes) เกิดขึ้นในขณะเปลี่ยนสถานะซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้ วงจรกิจฟเฟอเรนเชียลจะไวต่อสัญญาณปลายแหลมมาก จึงทำให้ไม่สามารถใช้เป็นส่วนเปรียบเทียบสำหรับวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่นี้ได้

ในการทดสอบนี้ ใช้เครื่องมือต่อไปนี้สำหรับอ้างอิง

HP 4261A

LCR Meter

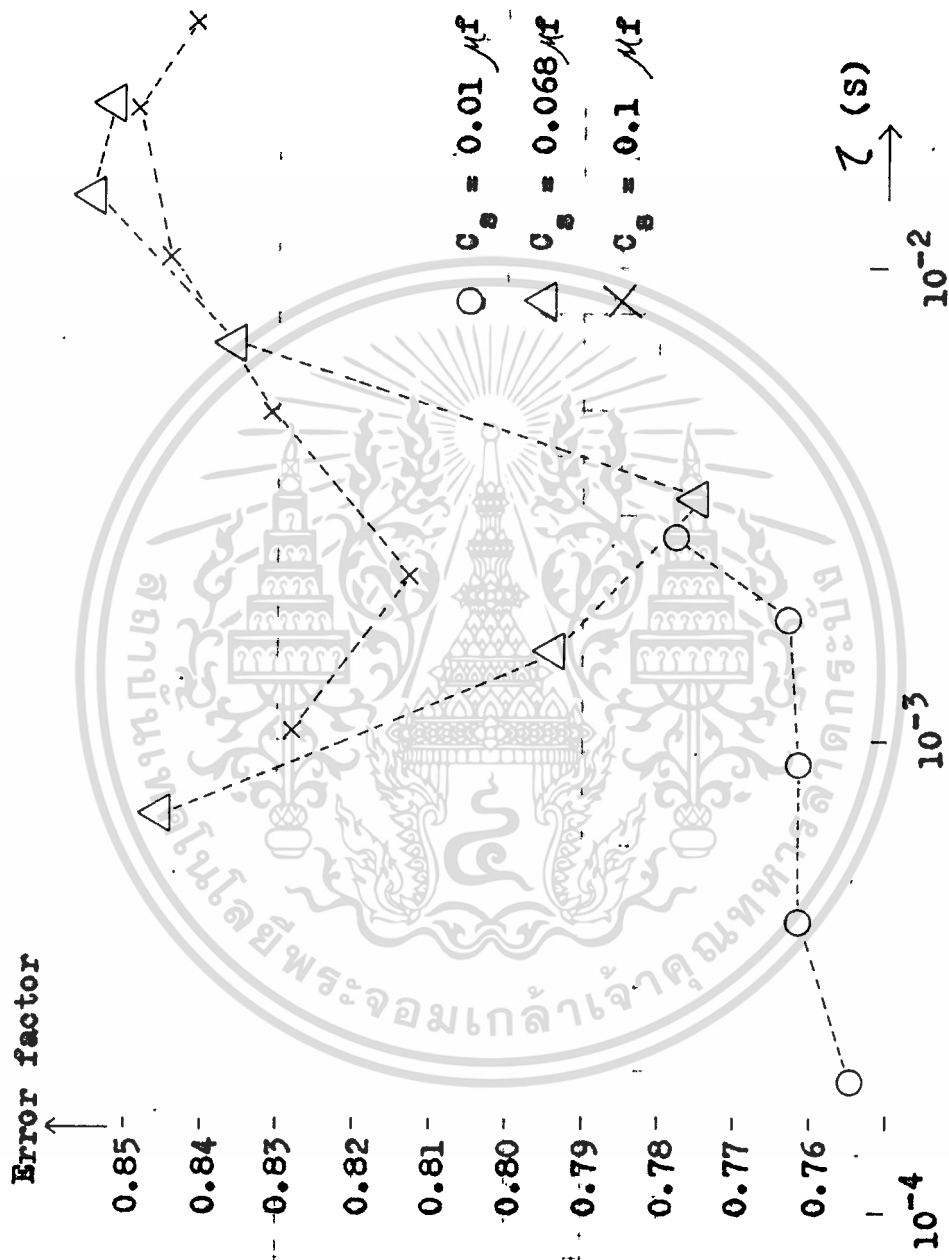
HP 5302A

Frequency counter

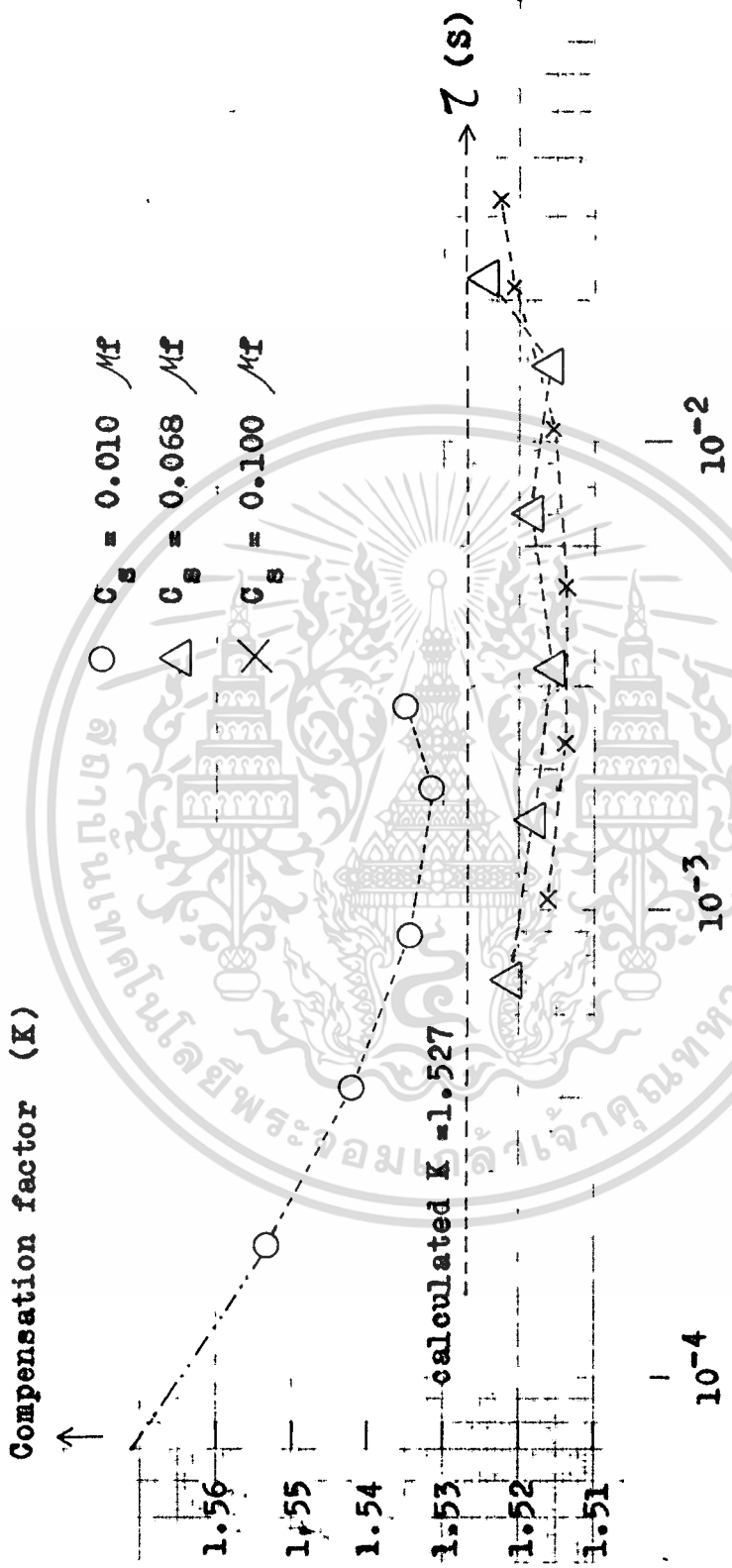
ผลการทดสอบกับส่วนเปรียบเทียบทั้งสองแบบข้างต้นแสดงไว้ใน ภาพที่-19 และ ภาพที่-20 ตามลำดับ

จาก ภาพที่-19 จะเห็นว่าโวลต์ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.86 ของโวลต์สัญญาณตัวอย่าง แสดงว่าสัญญาณเชิงเส้นที่สร้างขึ้นมีค่าโวลต์ต่ำกว่าโวลต์ของสัญญาณตัวอย่างเสมอซึ่งสอดคล้องกับหลักการ เปรียบเทียบที่แสดงไว้ใน บทที่ 2(ภาพที่-6) ส่วนการที่มีค่าโวลต์ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็นถึง 30% และมีค่าโวลต์เบี่ยงเบนประมาณ 10% นั้นเข้าใจว่าเกิดจากออฟเซต ของระดับสัญญาณศูนย์ ระหว่างสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบกัน และทรานเซียนที่จุดเริ่มต้นซึ่งเปลี่ยนแปลงไปโคเมื่อค่าของ RsCs เปลี่ยนแปลง

จาก ภาพที่-20 ผลการเปรียบเทียบ โวลต์ที่วัดได้กับโวลต์ตัวอย่าง (โวลต์ของสัญญาณเชิงเส้นที่สร้างขึ้นทำการวัดโดยตรงไม่มีค่าคงตัวชดเชย) มีค่าเบี่ยงเบนจากค่าคงตัวชดเชยที่คำนวณทางทฤษฎีเพียง 2.55% ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดถึงการเล็งผลจากออฟเซต และ ทรานเซียน โค



ภาพที่-19 แสดงผลการทดสอบ ของส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณโดยตรง



ภาพที่-20 แสดงผลการทดสอบ ของส่วนเปรียบเทียบกับระดับมาตรฐาน  
ระดับมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 5.4 การใช้งานเป็น เครื่องมือวัดความจุของ คาปาซิเตอร์

โดยเลือกค่า  $R_s$  มาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน และนำ คาปาซิเตอร์ ใดๆ มาต่อในตำแหน่งของ  $C_s$  จากนั้นวัดความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (ใช้เครื่องนับความถี่) แล้วนำมาคูณกับค่าคงตัวที่เหมาะสม ก็จะได้เป็นค่าความจุของ คาปาซิเตอร์ ที่นำมาต่อไว้ในตำแหน่งของ  $C_s$  สำหรับค่าคงตัวที่จะนำมาคูณนั้นคำนวณได้จากสมการ 5.2

จาก สมการ 5.1

$$\begin{aligned} \text{โวลต์} &= 2 \cdot f \cdot V_{\text{ref}} \\ K \cdot \text{โวลต์} &= V/\tau = V/RC \\ C &= \frac{V}{R \cdot K \cdot 2 \cdot f \cdot V_{\text{ref}}} \end{aligned} \quad 5.2$$

ผลการทดสอบแสดงไว้เป็นตารางใน ภาพที่-21 โดยใช้ค่าคงตัวต่างๆดังนี้

ระดับสูงสุดสัญญาณสามเหลี่ยม	=	4.9V	
ระดับต่ำสุดสัญญาณสามเหลี่ยม	=	0.0V	$R = 2.21 \text{ M}\Omega$
ระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน	=	3.0V	
ค่าความจุ	=	$\frac{0.15118636}{\text{ความถี่}}$	(คำนวณจาก สมการ 5.2)

จากค่าความจุที่วัดได้ (ภาพที่-21) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุที่อ่านจาก HP 4216A จะมีความแตกต่างอยู่พอสมควร โดยเฉพาะเมื่อค่าความจุต่ำๆ แต่เมื่อนำค่าความจุ 26pF บวกเข้ากับค่าที่อ่านได้จาก HP 4216A LCR meter จะเห็นว่าค่าความจุใหม่ใกล้เคียงกันมาก 26pF นี้เป็นค่าความจุแฝง (stray capacitance) ซึ่งอยู่ในสายนำที่ใส่ต่อคาปาซิเตอร์ที่ทำการวัดกับวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่ที่เรทดสอบ สำหรับค่าคลาดเคลื่อนของการวัด คาปาซิเตอร์ 24pF เนื่องจาก คาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดสภาวะ พนจากวงจรควบคุม(คานความถี่สูง) ของวงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่

ที่ทำการศึกษาทดสอบ ส่วนค่าคลาดเคลื่อนอีกช่วงหนึ่งที่สังเกตได้คือจากค่า คาปาซิเตอร์ ที่มากกว่า  $0.005 \mu F$  ขึ้นไป เนื่องจากค่าคงตัวเวลาของสัญญาณตัวอย่างี่เพิ่มขึ้นทำให้ความของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมยาวขึ้นมาก อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถเปรียบเทียบกับค่าคงตัวเวลาของส่วนตรวจสอบสัญญาณคลาดเคลื่อน (ภาพที่-9) จึงทำให้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นอยู่ในสภาวะอเสถียร ค่าคลาดเคลื่อนนี้สามารถลดลงได้โดยเพิ่มค่าคงตัวเวลาให้กับส่วนตรวจสอบสัญญาณคลาดเคลื่อน แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงสภาวะพ่นจากการควบคุม (ค่าความถี่ต่ำ) ของวงจรด้วย



Capacitance in pf

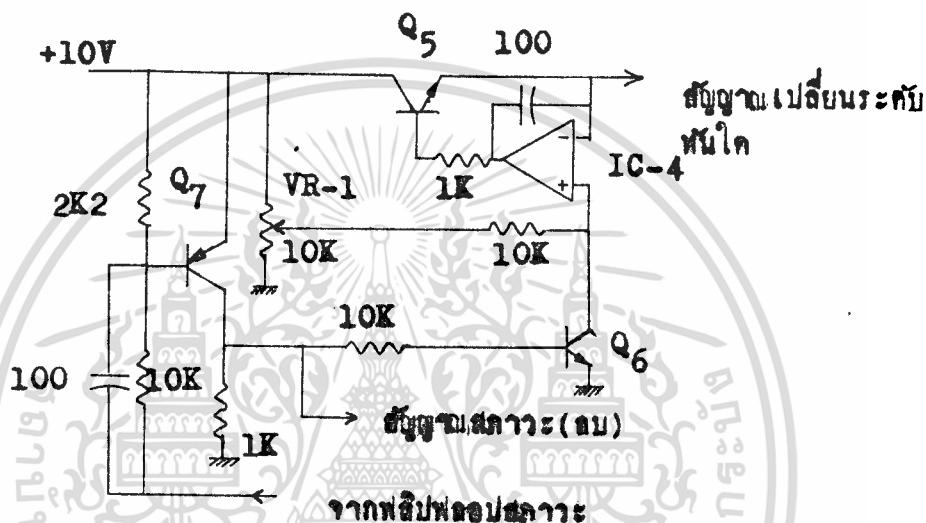
face value	<u>measured</u>	HP-4216A	<u>HP-4216A +26pf</u>
24.0	62.628	25.2	51.2
50.0	71.650	48.4	74.4
150.0	170.5815	145.5	171.5
200.0	230.1863	204.0	230.0
300.0	326.7481	301.0	327.0
500.0	527.7011	501.0	527.0
1000.0	951.450	926.0	952.0
2200.0	2266.8312	2240.0	2266.0
5000.0	5583.220	5650.0	5676.0
10000.0	9390.045	9400.0	9426.0
18000.0	17998.326	17850.0	17876.0
39000.0	20430.589	40700.0	40726.0
100000.0	37296.590	105900.0	105926.0

ภาพที่-21 ตารางแสดงผลการวัดความจุของ คาปาซิเตอร์ โดยใช้วงจรแปลงโวลต์เป็นความถี่ เปรียบเทียบกับ ค่าความจุที่วัดได้จาก HP-4316A LCR meter



## 6.2 ส่วนรับสัญญาณ เปลี่ยนระดับพันโค

ศักดาของสัญญาณ เปลี่ยนระดับพันโคมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ โสอปของสัญญาณตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่สามารถจ่ายสัญญาณ เปลี่ยนระดับพันโคที่ทราบค่าแน่นอนได้ และศักดาไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระที่แปรไป วงจรแสดงไว้ใน ภาพที่-23

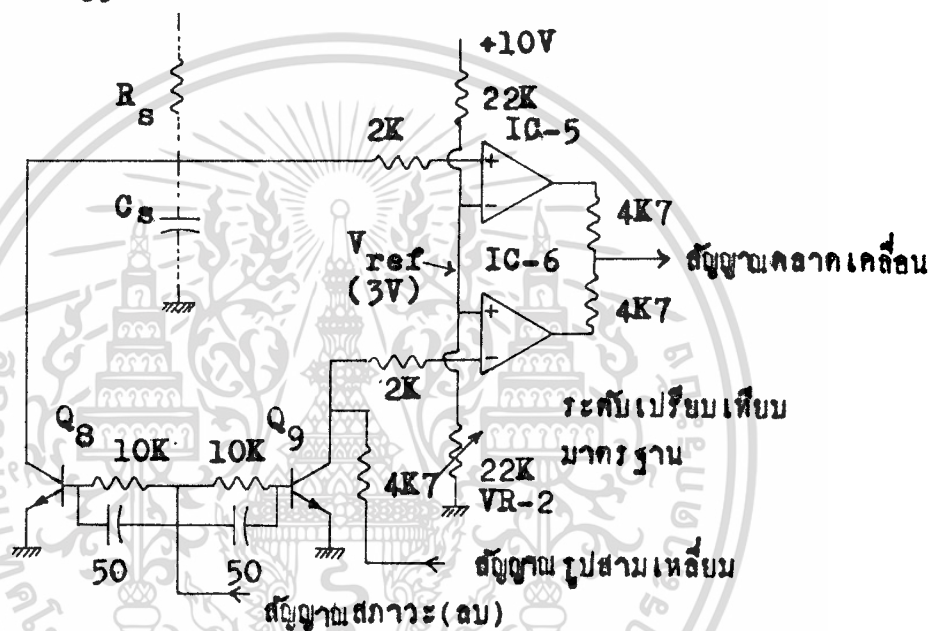


ภาพที่-23 ส่วนรับสัญญาณ เปลี่ยนระดับพันโค

และ IC -4 เป็นวงจรจ่ายศักดา ซึ่งจะให้ศักดาที่ ลิมิตเตอร์ ของ Q 5 เท่ากับ ศักดาที่จ่ายออกมาจาก VR-1 Q6 ทำงานเป็น สวิตช์ ซึ่งถูกควบคุมจาก ฟิลิปพลอป ผ่าน Q 7 เพื่อตัดวงจรให้ศักดาจาก VR-1 ออกสู่ศูนย์ (ground) เมื่อต้องการให้ศักดาที่ จุดสัญญาณออกลดลงสู่ศูนย์อย่างทันที และให้ศักดาที่จุดสัญญาณออกเพิ่มขึ้นอย่างทันทีเช่นเดียวกันเมื่อสัญญาณสถานะจาก ฟิลิปพลอป เปลี่ยนไป ส่วนขนาดของสัญญาณเปลี่ยนระดับ พันโคปรับได้จาก VR -1

6.3 ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน  
 การทำงานของส่วนเปรียบเทียบเป็นแบบเดียวกับที่บรรยายไว้ใน หัวข้อ 2.4 ส่วนค่า  
 ระดับสัปดาห์มาตรฐานปรับได้จาก VR-2 ดังแสดงวงจรใน ภาพที่-24

สัญญาณเปลี่ยนระดับทันที



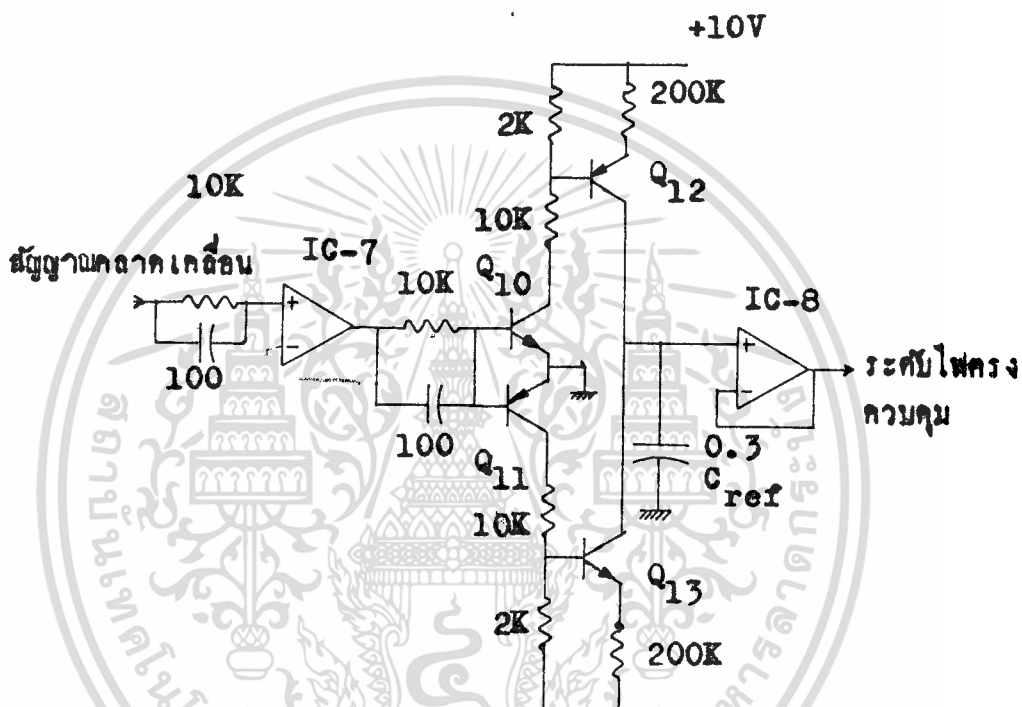
ภาพที่-24 ส่วนเปรียบเทียบโสอบ

ทรานซิสเตอร์ Q 8 ทำหน้าที่สัปดาห์สัญญาณทัวอย่างเมื่อสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดที่กำหนด (หยุดการเปรียบเทียบ) ส่วน Q 9 จะสัปดาห์ให้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมในช่วงโสอบที่เป็นลบ ซึ่งจะแปลงสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณเชิงเส้น โดยทรานซิสเตอร์ทั้งสองรับสัญญาณสภาวะจาก ทรานซิสเตอร์ Q 23

คาปาซิเตอร์ 50 pF สองตัวมีไว้เพื่อชดเชยความเร็วในการทำงานของ ทรานซิสเตอร์ Q8 , Q9 ที่ลดลงเนื่องจากค่าความจุแฉง อิมิตเตอร์-เบส การชดเชยที่จุดนี้จะต้องทำไว้พอดีเพื่อไม่ให้ความเร็วในการทำงานลดลงและไม่เกิดการชดเชยเกินเลยซึ่งจะกลายเป็นฮอฟเซ็ท ที่วงจรเปรียบเทียบได้

## 6.4 ส่วนตรวจสอบสัญญาณคลาดเคลื่อน

การทำงานได้บรรยายไว้แล้วในหัวข้อ 3.2.2 วงจรแสดงไว้ใน ภาพที่-25

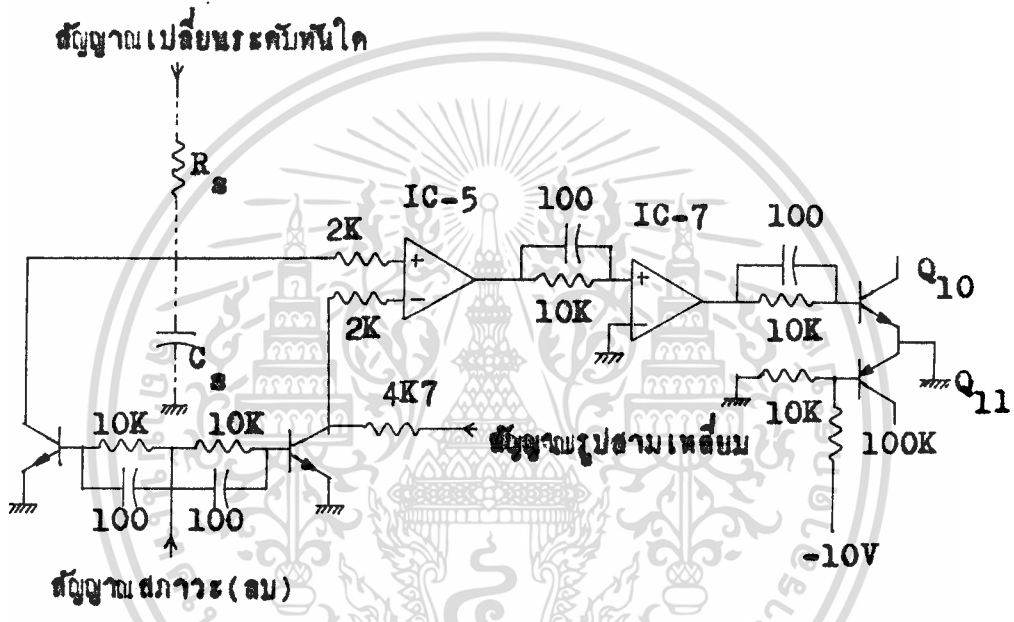


ภาพที่-25 ส่วนตรวจสอบสัญญาณคลาดเคลื่อน

วงจรไบอัสของทรานซิสเตอร์ Q 12, Q 13 และค่าความจุของ C<sub>ref</sub> เป็นแพคเตอร์กำหนดค่าคงตัวเวลาของการควบคุม ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนได้ง่ายโดยเลือกเปลี่ยน C<sub>ref</sub> หรือ ความต้านทานอิมิตเตอร์ ของ Q 12, Q 13 ได้ ส่วน IC -7 และ IC -8 ทำหน้าที่กัน (buffer) สัญญาณเท่านั้น

6.5 ส่วนเปรียบเทียบ และ ส่วนตรวจสอบค่าคงที่เคลื่อน สำหรับแบบเปรียบเทียบ ระบุสัญญาณ โดยตรง

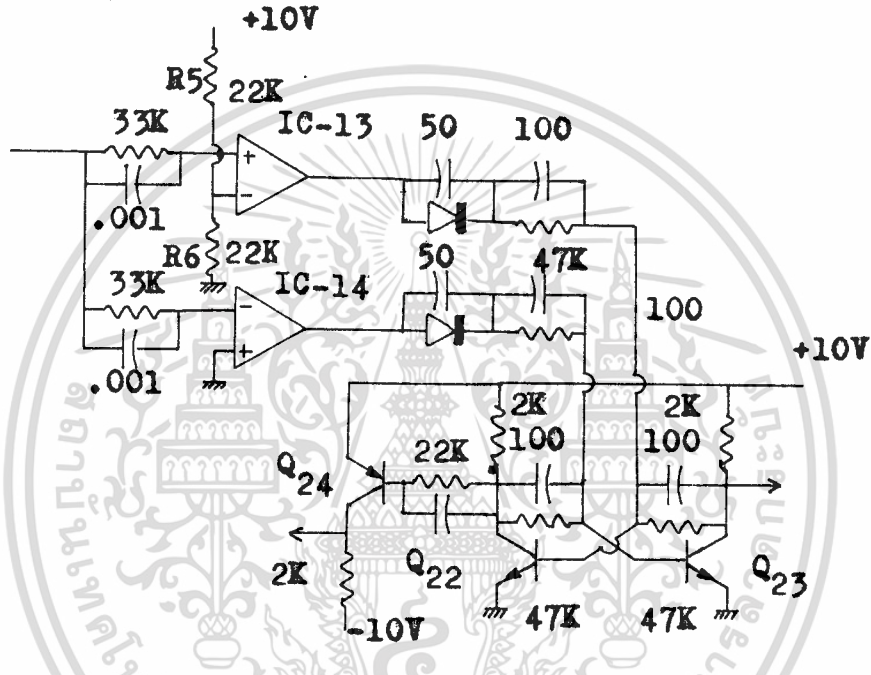
การทำงานส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับ หัวข้อ 6.3 และ 6.4 วงจรแสดงไว้ใน ภาพที่-26



ภาพที่-26 ส่วนเปรียบเทียบ และ ส่วนตรวจสอบค่าคงที่เคลื่อน สำหรับแบบเปรียบเทียบระบุสัญญาณ โดยตรง

สำหรับในส่วนเปรียบเทียบ อก IC-6 ออกใช้เพียง IC -5 เพื่อให้เป็นการเปรียบเทียบ โดยตรง IC -7 เปลี่ยนจากวงจรค้นสัญญาณ เป็นวงจรตรวจสอบระดับศักย์ผ่านศูนย์ และ โมธัส Q 10 เปลี่ยนค่ากระแสของ Q 11 ให้ต่ำลงจากเดิมประมาณ 10 เท่า เพื่อให้ เป็นวงจรรายกระแสคงที่ของ  $C_{ref}$

6.6 ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณสองระดับ และ ฟลิปฟลอป (ส่วนสภาวะ)  
 สำหรับระดับของสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น ได้เลือกระดับศักดา ศูนย์ และ  
 เป็นระดับเปลี่ยนสภาวะของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยใช้วงจรดังแสดงไว้  
 ใน ภาพที่-27

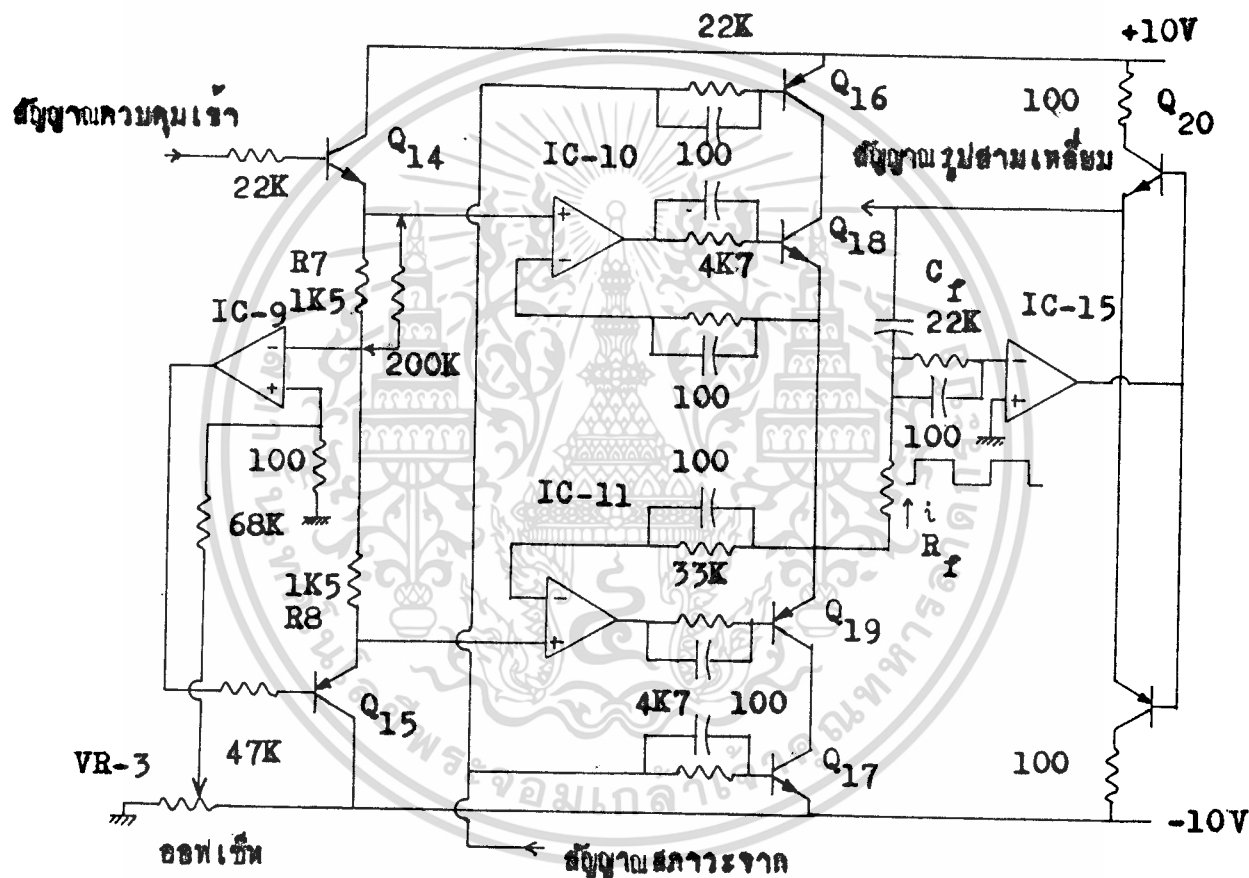


ภาพที่-27 ส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณสองระดับ และ ฟลิปฟลอป

IC- 13 และ IC- 14 เป็นส่วนเปรียบเทียบระดับสัญญาณ สัญญาณเข้าจะถูกเปรียบเทียบ  
 เทียบกับระดับ 4.9V (ควบคุมโดย R3, R4 ) โดย IC-13 และเปรียบเทียบกับระดับ ศูนย์  
 โดย IC- 14 สัญญาณออกจากส่วนเปรียบเทียบทั้งสองจะไปปรับสภาวะของ ฟลิปฟลอป แบบ  
 ปรับสภาวะได้ ซึ่งประกอบขึ้นจาก ทรานซิสเตอร์ Q22, Q23 โดยมี Q24 ปรับระดับ  
 สัญญาณให้เป็น +10V, -10V สำหรับจ่ายให้กับวงจรขั้วกระแสสลับสี่เหลี่ยม กล่าวโดยสรุป  
 ฟลิปฟลอป จะเปลี่ยนสภาวะ เมื่อ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมขึ้นถึงระดับ +4.9V  
 และเมื่อลดลงถึงระดับศูนย์

6.7 ส่วนขั้วกระแสรูปสี่เหลี่ยม

ส่วนนี้จะแยกย่อยลงไปเป็นสามส่วนคือ ส่วนกำเนิดศักดาจินตนาการ ส่วนขั้วกระแสสลับ และ ส่วนควบคุมศักดาศูนย์จินตนาการ ทั้งมีรายละเอียดวงจรแสดงไว้ใน ภาพที่-28



ภาพที่-28 ส่วนขั้วกระแสรูปสี่เหลี่ยม

ส่วนกำเนิดศักดาจินตนาการ จะรับสัญญาณควบคุมเข้าที่ เบส ของ Q14 แล้วใช้ IC-9 สร้างศักดาจินตนาการ (ระดับศักดาเท่ากันแต่ศักดาตรงข้ามกัน) โดยควบคุมจาก R7 ,R8 ให้เกิดขึ้นที่ อิมิตเตอร์ ของ Q15 VR-3ใช้ปรับ ออฟเซ็ท ของส่วนกำเนิด ศักดาจินตนาการทั้งหมด เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ถูกต้องไม่ว่าระดับสัญญาณ จะมาก หรือน้อยก็ตาม

หมายเหตุ ความต้านทาน 200K ที่ขั้วขาของ R7 ใช้ชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ปรับระดับสัญญาณการคำนวณได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนขั้วกระแสสลับ ประกอบขึ้นจาก IC-10 และ Q18 กับ IC-11 และ Q19 เป็น วงจรจ่ายศักดาตรง บวก และ ลบ ตามลำดับ ซึ่งวงจรจ่ายศักดาตรงทั้งสองจะรับศักดา อ่างอิงจาก ส่วนกำเนิดศักดาจินตนาการ ทรานซิสเตอร์ Q16 และ Q17 เป็น สวิตช์ ที่ถูกควบคุมโดยสัญญาณสภาวะให้สลับกันเปิดให้วงจรจ่ายศักดาตรง บวก และ ลบ สลับ กันทำงาน จึงทำให้สัญญาณที่ อิมิตเตอร์ของ Q18 และ Q19 เป็นศักดาคล้ายรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเมื่อศักดาจ่ายให้กับความต้านทาน ( $R_f$ ) ที่มีอีกปลายหนึ่งต่ออยู่กับศักดาศูนย์ จะได้ กระแสสลับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ส่วนควบคุมศักดาศูนย์จินตนาการ ก็กล่าวมาแล้วข้างต้นปลายหนึ่งของ  $R_f$  ต่อกับศักดาศูนย์เพื่อให้ได้กระแสสลับรูปสี่เหลี่ยม แต่กระแสทั้งหมดนี้จะต้องผ่านเข้าสู่  $C_f$  เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่สี่เหลี่ยม ทั้งนี้แทนที่จะต่อจากเชื่อมระหว่าง  $R_f$   $C_f$  ลงกับจุดศักดาศูนย์ (สายดิน) จึงต่อเข้ากับจุดศักดาศูนย์จินตนาการ ซึ่งจุดนี้เป็น จุดสัญญาณเข้าของ มอส ออป-แอมป์ และอีกปลายหนึ่งของ  $C_f$  ต่อเข้ากับจุดที่ศักดาถูก ควบคุมจากจุดสัญญาณออกของ IC-15 ผ่าน ทรานซิสเตอร์ ขยายกำลัง Q20 , Q21 ดังนั้นสัญญาณที่จุดนี้จะมีศักดาที่หาได้ IC-15 สามารถรับมาหรือจากที่จุดสัญญาณเข้า ก็ฟ เพอเรนเชียลไว้ได้ คือ กระแสเข้าสู่ ออป-แอมป์ เป็นศูนย์และศักดา ก็ฟเพอเรนเชียล เป็นศูนย์เช่นเดียวกัน ในกรณี ที่จุดสัญญาณเข้าจุดหนึ่งของ IC-15(จุดสัญญาณเข้าบวก) ต่อกับศักดาศูนย์ จะได้ว่าจุดต่อระหว่าง  $R_f$  กับ  $C_f$  มีศักดาเป็นศูนย์ และกระแสจาก  $R_f$  ทั้งหมดจะผ่านเข้าสู่  $C_f$  ควบ

บทที่ 7  
บทสรุป

ส่วนแรกของวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึง วิธีการวัดโสลปของสัญญาณในลักษณะต่างๆกัน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น การวัดโดยตรง และการวัดทางอ้อมซึ่งจะเหมาะสมกับการใช้งานใน ลักษณะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การวัดโดยตรง (แบบใช้วงจรคิฟเพอ เร็น เชียล) อาจใช้ ในระบบควบคุมทั่วไป แต่ในระบบที่ฟังก์ชันของสัญญาณที่ทำการวัดแน่นอน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัด L, C การวัดทางอ้อมจะให้ความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยง ผลจาก ฮอฟเซ็ท และ ทรานเซียน ซึ่งต้องเกิดขึ้นเสมอในวงจร อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับวงจรวัดโสลปทางอ้อม โดยใช้การเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับระดับเปรียบเทียบมาตรฐาน ที่ได้นำเสนอไปแล้วนี้ นอกจากจะไม่ต้องยุ่งยากกับการชกเชย ฮอฟเซ็ท และ ทรานเซียน ซึ่งเป็นปัญหายุ่งยาก (โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง) แล้ว ยังไม่ต้อง ควบคุมค่าคงตัว เวลาของวงจรคิฟเพอ เร็น เชียลให้เหมาะสมกับโสลปที่ทำการวัด หรือ ควบคุมค่าคงตัว เวลาของวงจรคิฟเพอ เร็น เชียลสองวงจรซึ่งนำมาใช้ในการ เปรียบเทียบ กันอีกด้วย





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## Abstract

In part II, part of King Mongkut Institute of Technology "Anti-tank Missile" development project, "Missile Guiding System" is presented. As the project had been carry on for just a few years and still in elementary progress, details presented here are how we tackle various missile manoeuvre effect and study of a missile control system that missile operator collect missile trace data for an electronic system to control missile accurately without need of operator own decision for better field performance.

## บทที่ 1

### บทนำ

สำหรับส่วนที่สองของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นผลงานการค้นคว้าบางส่วนของ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนา จรวดนำวิถีต่อสู้รถถัง ของสภาวิจัยแห่งชาติ โดยมีข้อกำหนดไว้ว่า วัสดุอุปกรณ์ ที่ใช้ในการจัดทำจรวดนำวิถีนี้จะต้องหาได้ง่ายและมีราคาไม่สูงนัก

จรวดนำวิถีต่อสู้รถถังนี้ จัดอยู่ในระบบนำวิถีระยะสั้น ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองระบบคือ

1. ระบบแสงเป้าโดยอัตโนมัติ (Homing method)
2. ระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง (Command method)

เท่าที่ได้พิจารณาจรวดนำวิถีแบบต่างๆแล้ว เห็นว่าระบบแสงเป้าโดยอัตโนมัติ จะให้ผลการทำงานที่แน่นอนกว่า และระบบควบคุมการบินอาจทำได้ง่ายเนื่องจากสามารถใช้เป้าหมายเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการบินได้โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์อ้างอิงเพิ่มเติม แต่เป็นที่น่าเสียดายที่อุปกรณ์แสงเป้า จะต้องเป็น ระบบเรดาร์ และ ไมโครเวฟ ซึ่งต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและมีราคาแพงมากอีกด้วย ยกเว้นระบบแสงเป้าโดยอัตโนมัติที่ใช้การติดตามรังสีความร้อน (infrared rays) ที่อาจพัฒนาขึ้นได้โดยราคาไม่สูงเกินไป แต่ระบบนี้เหมาะสมที่จะใช้กับการติดตามเครื่องบินไอพ่นเท่านั้น

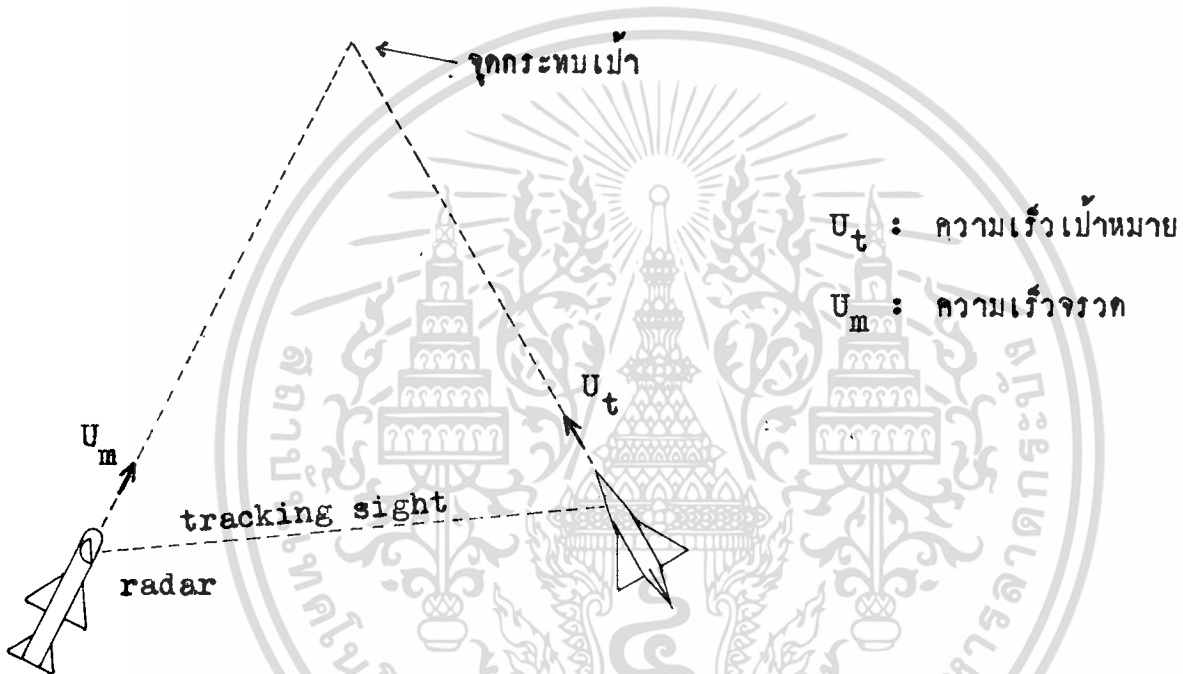
จรวดนำวิถีระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง มักจะเป็นจรวดขนาบที่เบาที่สามารถยิงจากบ่าทหารเพียงคนเดียวได้ (Blow pipe, Red eye, etc) การนำวิถีโดยระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง ไม่ต้องมีอุปกรณ์แสงเป้าติดตั้งอยู่ในตัวจรวดเลย จะมีเพียงเครื่องรับสัญญาณควบคุมจากภาคพื้นดิน ส่วนควบคุมการบินในสองแนวแกน (ควบคุมการบิน ขึ้น ลง และ เลี้ยว ซ้าย ขวา) และระบบโยโรอ้างอิง (ควบคุมการบินในแนวแกนที่สามคือ ป้องกันไม่ให้จรวดควงออกไปจากตำแหน่งเริ่มทำการยิง) เราสามารถนำเอา ระบบบังคับวิทยุแบบสองแนวแกน ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป (2 channel digital proportional remote control radio system) มารวมเป็นอุปกรณ์สำหรับการพัฒนาจรวดนำวิถีนี้ได้โดยสะดวก และราคาไม่สูงนัก สำหรับในแนวแกนที่สาม (rotation) ยังไม่มีค่าขอบอื่นใดที่ดีไปกว่าการใช้ โยโร ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งสัมบูรณ์ (absolute position sensor) โยโรจึงเป็นอุปกรณ์ที่ละเอียดอ่อนซึ่งอาจจะเป็นชิ้นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงที่สุดในระบบนำวิถีนี้ แต่จะไม่กล่าวถึงรายละเอียดของระบบโยโรในวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ได้ศึกษาโดยตรงเกี่ยวกับระบบโยโร

กล่าวโดยสรุปคือ เราได้เลือกที่จะพัฒนาจรวคนำวิถีใน ระบบปฏิบัติการค่าสัง วิทยานิพนธ์นี้ ได้เขียนขึ้นเพื่อแสดงแนวทางของระบบนำวิถีที่โคศึกษาและพัฒนาขึ้นมา รวมทั้งการจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical model) ของระบบ และการตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมของจรวก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาขั้นต่อไป



ทั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในบทนำ ระบบนำวิถีแบ่งออกได้เป็นสองระบบใหญ่ๆคือ ระบบแสวงเป้าโดยอัตโนมัติ และระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง ซึ่งจะได้แสดงวิธีการของแต่ละระบบ เพื่อให้เกิดความเข้าใจดังนี้

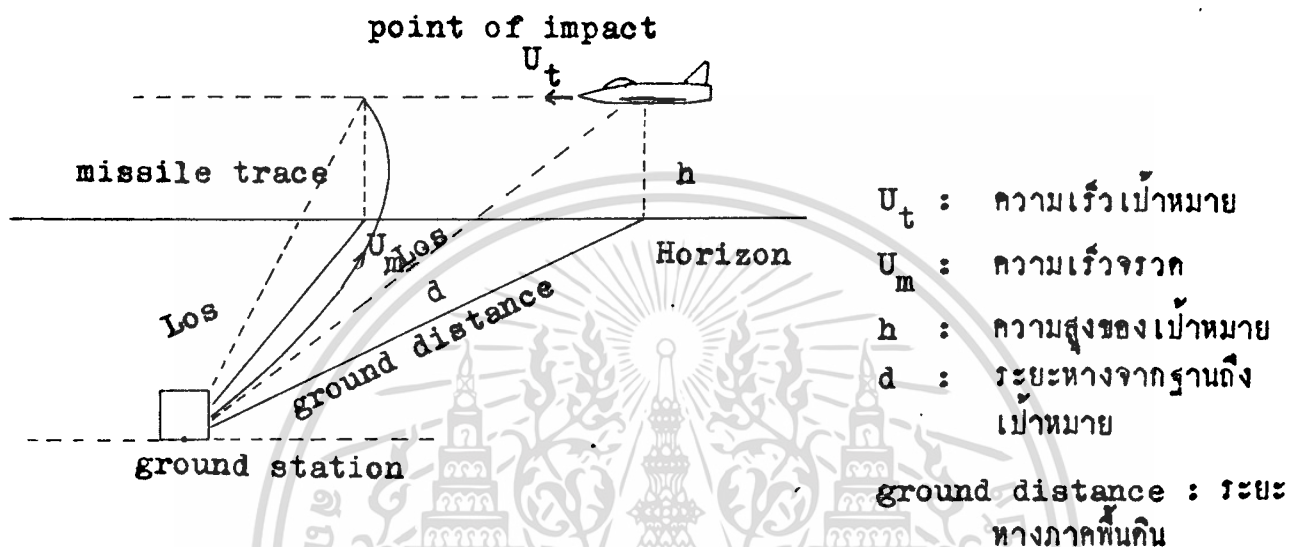
### 2.1 ระบบแสวงเป้าโดยอัตโนมัติ (Homing method)



ภาพที่-1 แสดงการทำงานของระบบแสวงเป้าโดยอัตโนมัติ

วิธีการยิงของจรวดจะถูกควบคุมจาก คอมพิวเตอร์ ภายในตัวจรวด ซึ่งได้รับข้อมูลความเร็ว ทิศทาง และระยะทาง ของเป้าหมายจากเรดาร์ตลอดเวลา ซึ่งโปรแกรมของคอมพิวเตอร์สามารถพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถติดตามเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งป้องกันการหลบหลีกการติดตามของเป้าหมายด้วย จะเห็นได้จาก ภาพที่-1 วิธีของจรวดไม่ได้ติดตามเป้าหมายโดยตรง แต่จะมีการปรับทิศทางล่วงหน้าไว้เพื่อให้การติดตามมีประสิทธิภาพ

## 2.2 ระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง (Command method)



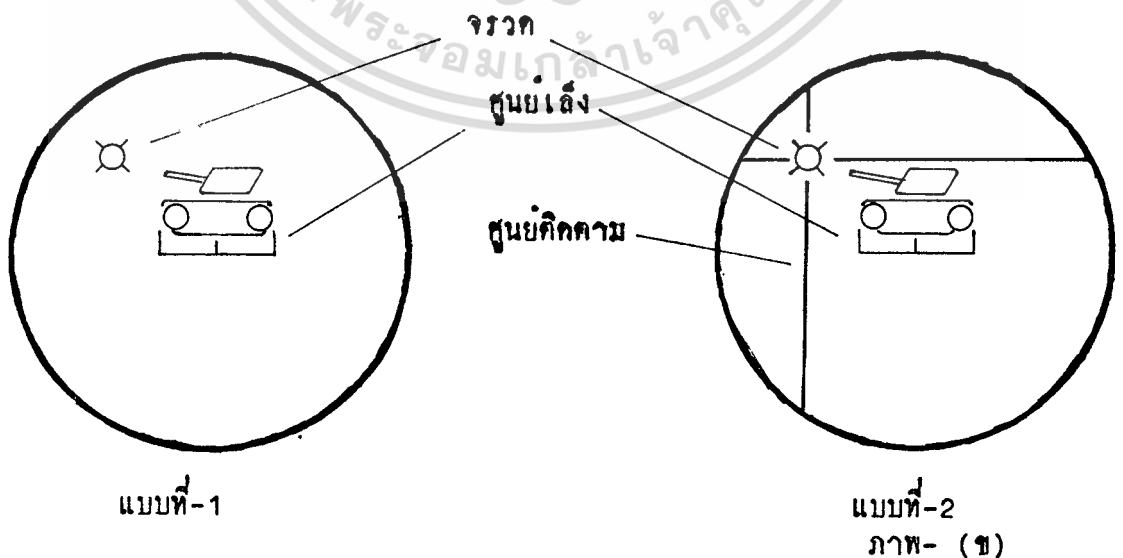
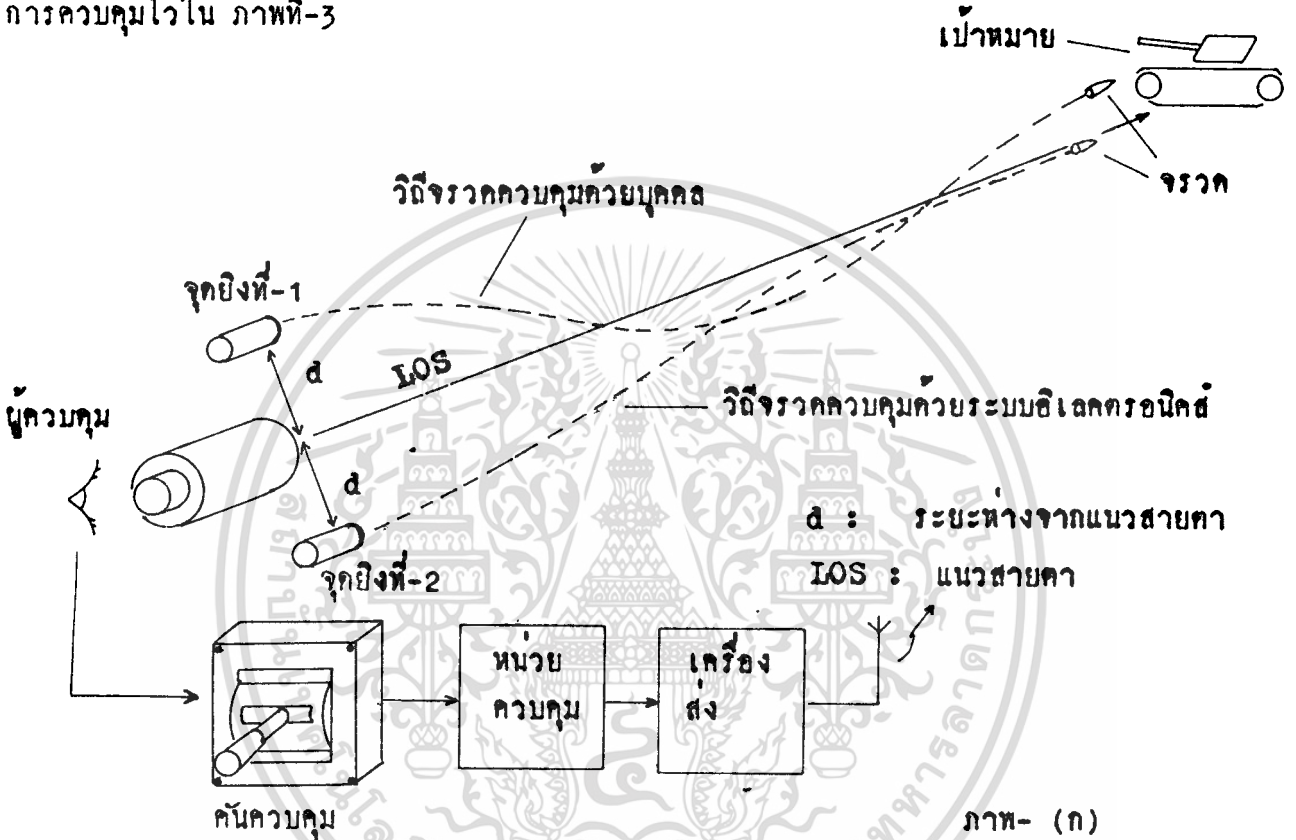
ภาพที่-2

แสดงการทำงานของระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง

สำหรับระบบปฏิบัติการตามคำสั่งนี้ การติดตามเป้าและการควบคุมวิถีจะทำจากภาคพื้นดิน ในกรณีที่เป็นจรวดขนาดใหญ่ การติดตามเป้าหมายอาจใช้ กล้องสองทางไกล กล้องโทรทัศน์ หรือกล้องอินฟราเรด ที่สามารถใช้ได้ในเวลากลางคืนด้วย ไม่ว่าจะเป็นกล้องติดตามชนิดใด จะเห็นว่ต้องสามารถต่อเชื่อมเส้นแนวสายตา (L.O.S. line of sight) จากฐานยิงถึงเป้าหมายได้ตลอดเวลา ยกเว้นกรณีที่เป็นจรวดขนาดใหญ่ซึ่งใช้เรด้าติดตามที่ติดตั้งไว้บนละจุกกับฐานยิง

### 2.3 ระบบนำวิถีที่ทำการพัฒนา

ระบบนำวิถีที่พัฒนาขึ้นจักเป็น ระบบปฏิบัติการตามคำสั่ง ขนาดเบา ซึ่งได้แสดงแผนผัง การควบคุมไว้ใน ภาพที่-3



ภาพที่-3 แสดงระบบควบคุมการยิงของจรวดนำวิถีขนาดเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใน ภาพที่-3 ผู้ควบคุม จะใช้กล้องติดตามเป้าหมาย ดังแสดงภาพที่ผู้ควบคุมมองเห็นไว้ใน ภาพที่-3(ข) โดยใช้ศูนย์เล็งติดตามเป้าหมายไว้ และสังเกตตำแหน่ง(แบบที่-1) ของจรวดที่ยิงออกไป แล้วทำการควบคุมให้จรวดเข้าสู่เป้าหมายด้วยการบังคับคันควบคุม ในลักษณะเกี่ยวกับการบังคับ รดยนต์เล็ก หรือเครื่องบินเล็ก บังคับด้วยระบบวิทยุทั่วไป สำหรับ แบบที่-2 จะเห็นว่ามีความยุ่งยากมากขึ้นมา เพื่อให้ผู้ควบคุมปรับคันควบคุมโดยที่ศูนย์ติดตามอยู่ที่ตำแหน่งของจรวดที่ยิงออกไป สัญญาที่ได้จากการควบคุมในลักษณะนี้จะไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมจรวดได้โดยตรง ต้องนำไปผ่านหน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะจัดสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมเพิ่มเติมเข้าไปก่อนส่งไปยังเครื่องส่งวิทยุ วิธีตาม แบบที่-2 นี้จะให้ผลการยิงที่แน่นอนกว่า แบบที่-1 ทั้งนี้เนื่องจากแพ็คเกจที่เพิ่มเติมเข้าไปโดยวงจร อิเล็กทรอนิกส์ นั้น เป็นแพ็คเกจควบคุมความไวในการตอบสนองของจรวด และแพ็คเกจสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้าด้วย จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยความชำนาญส่วนบุคคลของผู้ควบคุมการยิง โดยปกติแล้วผู้ควบคุมการยิงที่มีความชำนาญไม่เพียงพอ บังคับ(ควบคุม)จรวดใน แบบที่-1 จะทำให้เกิดวิถีกวานขึ้นได้ (overshoot) ซึ่งทำให้มีโอกาสพลาดเป้าหมายสูงดังแสดงไว้ใน ภาพที่-3(ก)

สำหรับการติดตามเป้าหมาย และควบคุมใน แบบที่-2 นี้ เป็นวิธีที่เราได้คิดขึ้น เพื่อลดปัญหาความชำนาญส่วนบุคคลของผู้ควบคุมการยิง และยังสะดวกกับการนำข้อมูลไปใช้กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาหาระบบที่เหมาะสมของหน่วยควบคุมทาง อิเล็กทรอนิกส์ด้วย



และที่เวลาต่อมา

$$\Delta \text{Trace} = V' \cdot \Delta t \cdot \sin(\Sigma \theta + \theta') \quad 3.1$$

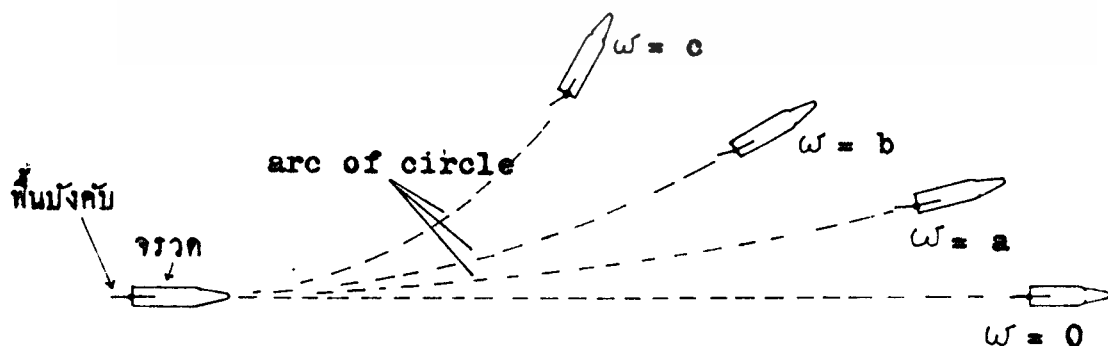
เพื่อความสะดวกในการคำนวณเบื้องต้น สมมุติให้ ความเร็วของจรวด มีค่าคงที่ และ เป้าหมายไม่เคลื่อนที่ จะเขียน สมการ 3.1 ได้ใหม่เป็น

$$\text{Trace} = E + \Sigma V \cdot \Delta t \cdot \sin(\Sigma \theta) \quad 3.2$$

จาก สมการ 3.2 จะเห็นได้ว่าเทอมที่ควบคุม Trace ใกล้เคียง พังกัณฑ์ของมุม  $\theta$  เท่านั้น แต่การที่จะติดตามค่าของมุม  $\theta$  จะเป็นการยุ่งยากเนื่องจากคองอักษณรูปวง พิเศษที่ละเอียดอ่อนเพิ่มเติมขึ้นอีก เราทราบจาก ฟิสิกส์ ทั่วไปว่า  $\theta = \omega \cdot t$  จึงเขียน สมการ 3.2 ได้ใหม่เป็น

$$\text{Trace} = E + \Sigma V \cdot \Delta t \cdot \sin(\Sigma \omega \cdot \Delta t) \quad 3.3$$

สมการ 3.3 ควบคุม Trace ได้จาก พังกัณฑ์ ของ ความเร็วเชิงมุมของจรวด ซึ่งจะสามารถทำได้สะดวกกว่า เนื่องจากการตอบสนองของจรวดต่อคำสั่งที่ไ้รับเพื่อควบคุม แพนบังคับทั้งสองแนวแกนนั้น จะ เป็นไปอย่าง ลินีียร์ (ในกรณี ที่ค่าจำกัดความนี้ไม่เป็นจริง ใ้แสดง สมการ เพื่อชดเชยไว้ในหัวข้อ 6.1) กล่าวคืออัตราการเบี่ยงเบนทิศทางของ จรวดแปร เปลี่ยนโดยตรงกับคำสั่งที่ไ้รับ โดยเฉพาะเมื่อสมมุติให้ความเร็ว เป็นค่าคงที่ อัตราการเบี่ยงเบนทิศทางก็คือ ความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) ของจรวดนั่นเอง ดู ภาพที่-5 ประกอบ



ภาพที่-5 แสดงการตอบสนองต่อคำสั่ง เบี่ยงเบนทิศทาง

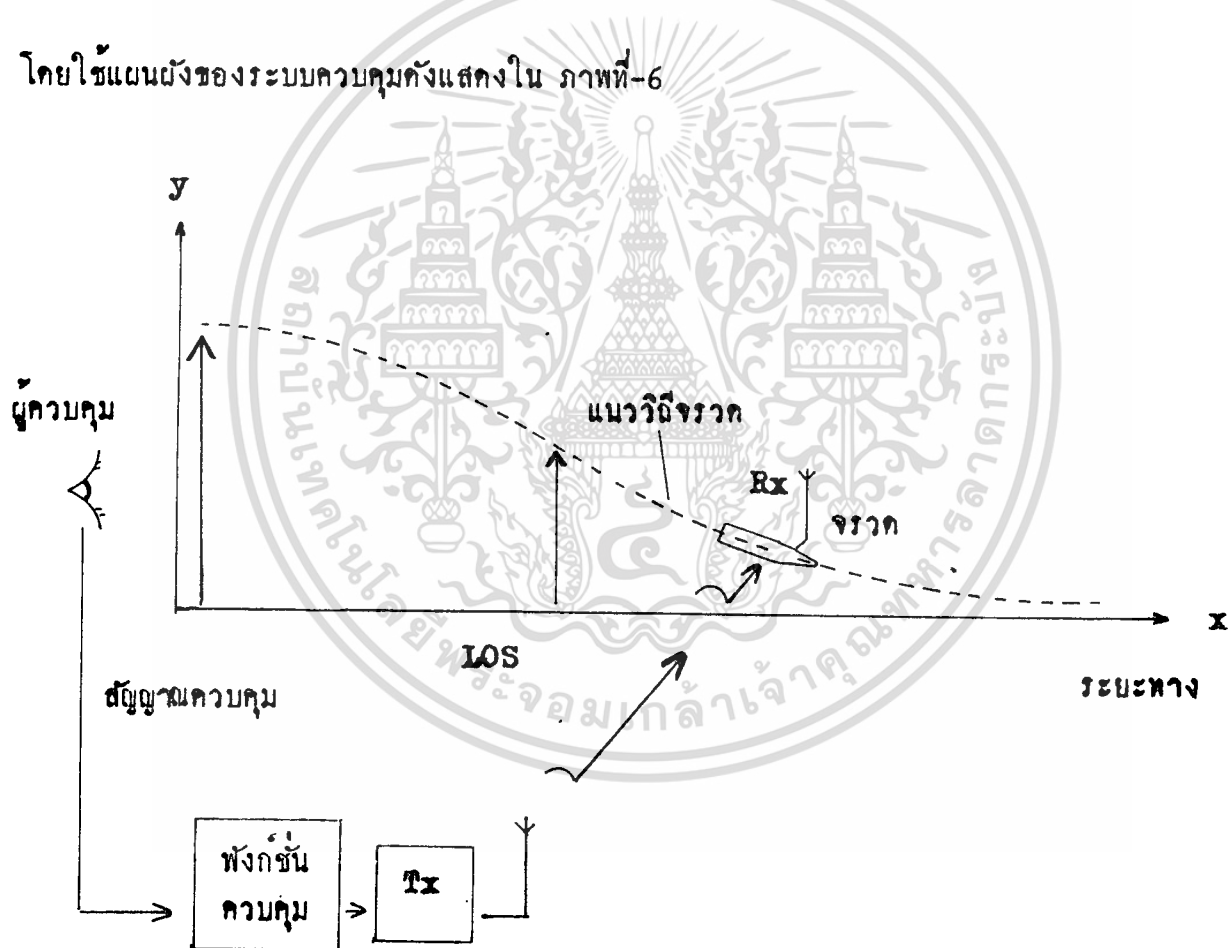
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สมการ 3.3 สามารถดัดแปลงเขียนใหม่ให้เป็น สมการต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\text{Trace} = E + \int_0^t V \cdot \sin\left(\int_0^t \omega dt\right) dt \quad 3.4$$

จะเห็นได้ว่า สมการ 3.4 เป็นสมการที่หาค่าตอบได้ยาก สำหรับชั้นเบื้องต้นนี้ จึงได้ใช้การคำนวณแบบ เลือกสุ่ม พังค์ชั้นของ ความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) แทนค่าลงใน สมการ 3.3 แล้วใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าตอบเป็นแบบ Numerical

โดยใช้แผนผังของระบบควบคุมดังแสดงใน ภาพที่-6



ภาพที่-6 แสดงแผนผังของระบบควบคุม

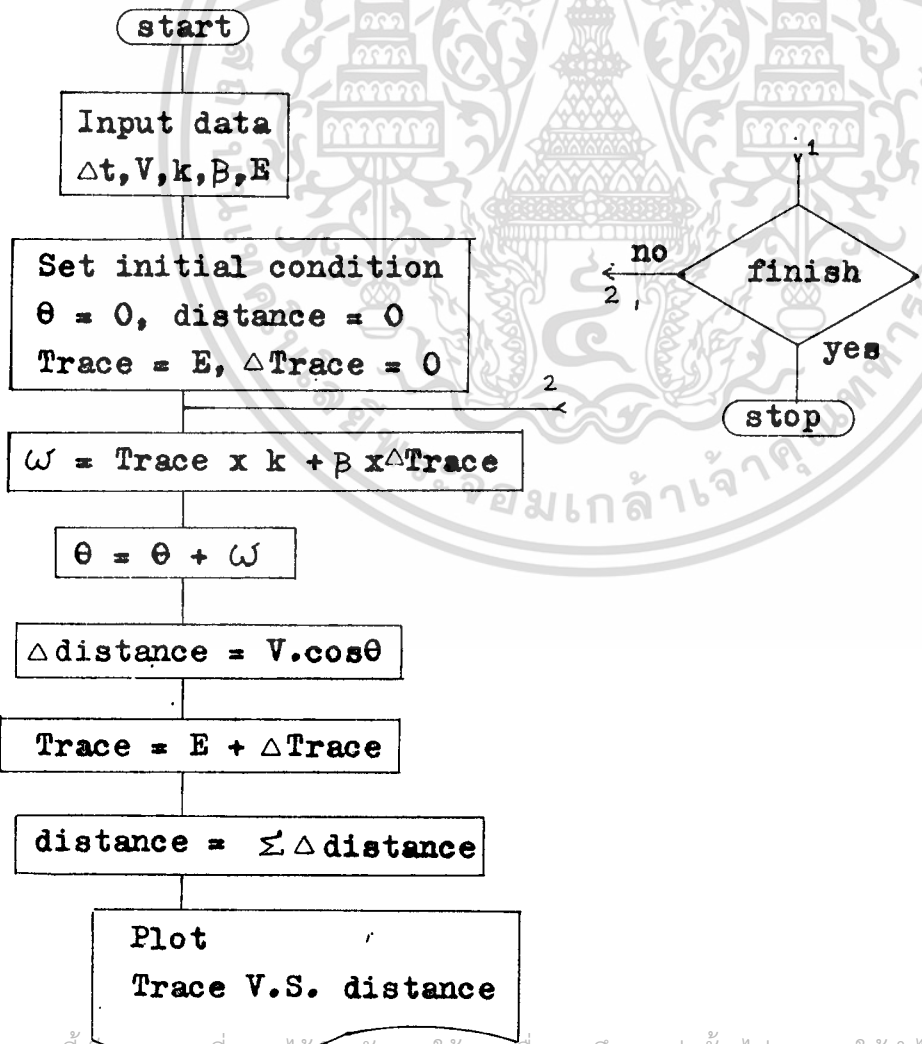
สำหรับการติดตามเป้าหมาย แบบที่-2 (บหน้า) จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมที่ได้ เป็น ข้อมูลของระยะทางระหว่างจรวดกับแนวสายตา (Trace) และการตอบสนองของคำสั่ง เป็นการเปลี่ยนความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) เราได้สมมุติ ฟังก์ชันทดสอบ ไข่แทนใน สมการ 3.3 ในลักษณะดกผันกับ Trace ไลสามแบบคือ

3.1  $\omega = (-k) \cdot \text{Trace}$   $k$  : ค่าคงตัวใดๆ

3.2  $\omega = (-\beta) \cdot \frac{\Delta \text{Trace}}{\Delta t}$   $\beta$  : ค่าคงตัวใดๆ

3.3  $\omega = (-k) \cdot \text{Trace} + (-\beta) \cdot \frac{\Delta \text{Trace}}{\Delta t}$

Flow chart สำหรับการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงไว้ใน ภาพที่-5



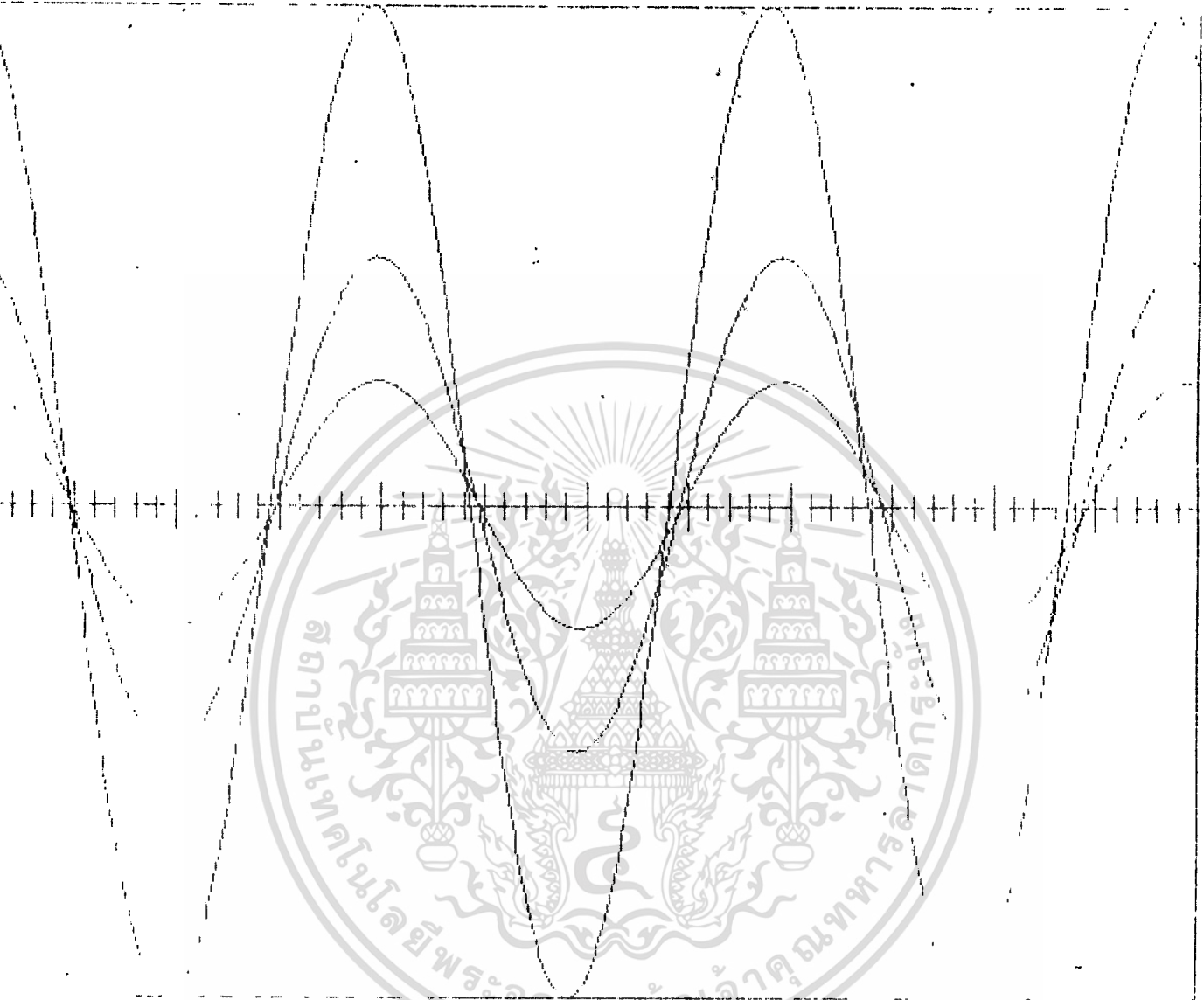
โปรแกรมคำนวณสำหรับเครื่องคำนวณ HP-45 แสดงไว้ในภาพที่-6 ส่วนผลการ  
คำนวณอื่นๆแสดงไว้ใน ภาพที่-7 ถึง ภาพที่-11

```

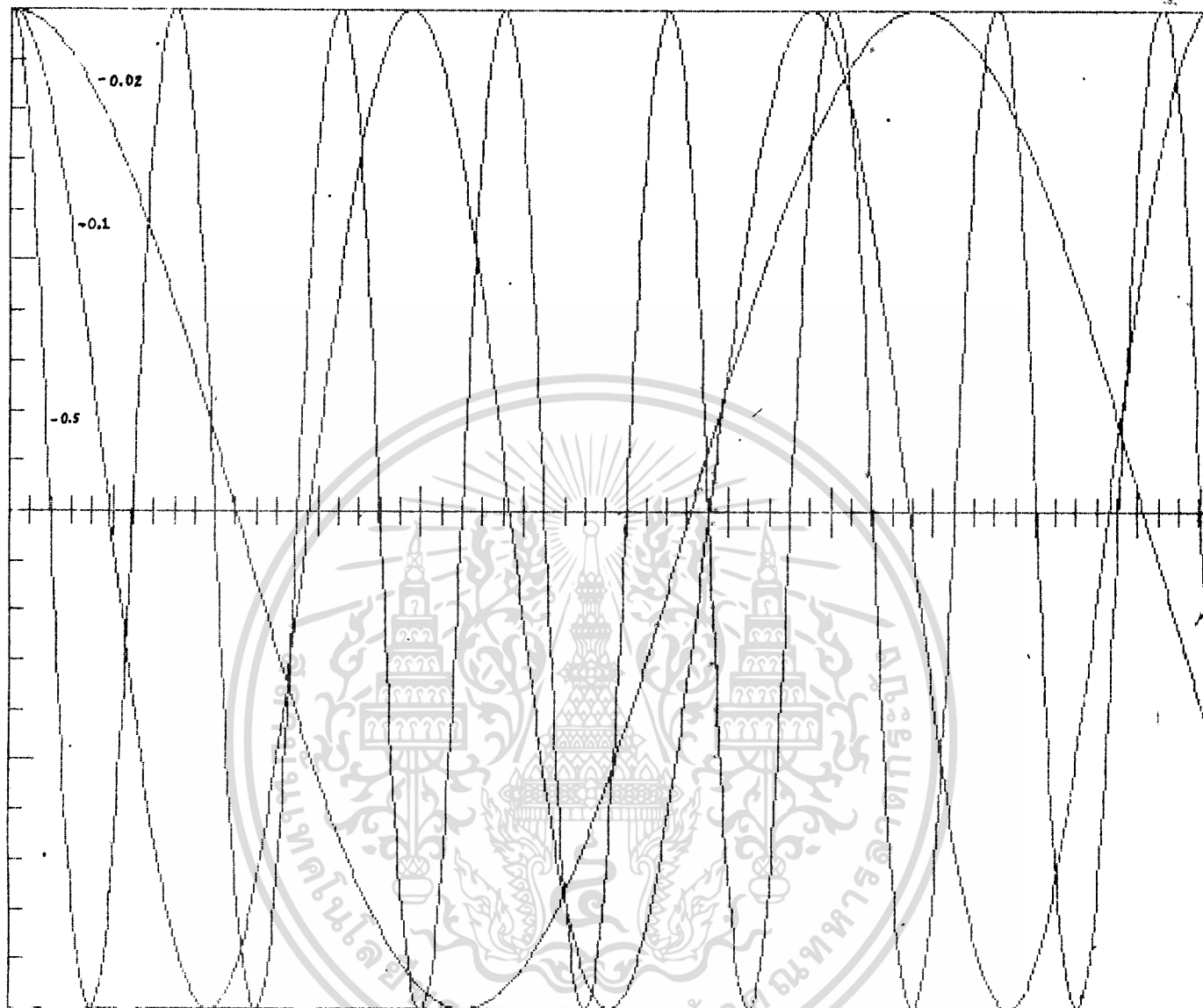
10 PLOTTER IS' 13, "GRAPHICS"
15 GRAPHICS
20 SCALE 0, 600, -10, 10
25 AXES 10, 1, 0, 0, 5, 5, 5
30 FRAME
40 INPUT V, T, A, K, B
60 S=0
70 F=0
80 R=0
90 Z=0
100 V=V*T
110 K=K*T
140 C=A*K
150 D=F*B
160 R=R+C+D
170 F=SIN(R)*V
180 H=COS(R)*V
190 Z=Z+H
200 A=A+F
230 PLOT Z, A, 1
240 N=N+1
250 IF Z<600 THEN GOTO 140
260 Y=Y+1
270 IF Y=3 THEN GOTO 300
280 PLOT 5, 5, -2
290 GOTO 40
300 END

```

ภาพที่-6 แสดงโปรแกรมการคำนวณ สมการ 3.3



- ภาพที่-7 แสดงผลการคำนวณ สมการ 3.3 โดยใช้ ทารามิเตอร์ ดังนี้
- $V = 100$  เมตร ต่อ วินาที
- $T = \Delta t = 0.01$  วินาที
- $K = k = -0.1$
- $B = \beta = 0.0$
- $A = B = 10, 5, 2.5$  เมตร ความถี่ต่างกัน
- ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร



ภาพที่-8 แสดงผลการคำนวณ สมการ 3.3 โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้

$$V = 100 \text{ เมตร ต่อ วินาที}$$

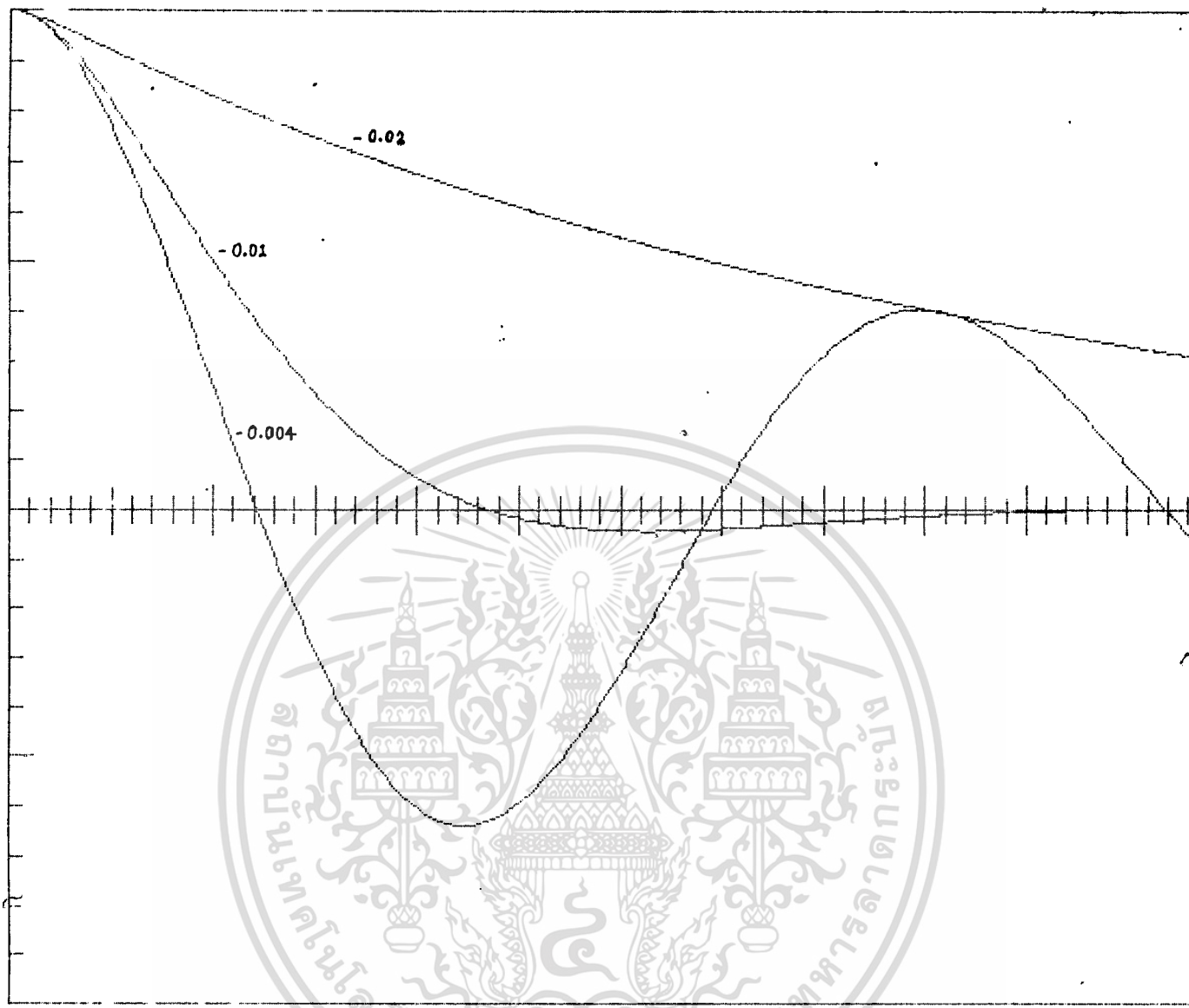
$$T = \Delta t = 0.01 \text{ วินาที}$$

$$K = k = -0.1, -0.02, -0.5$$

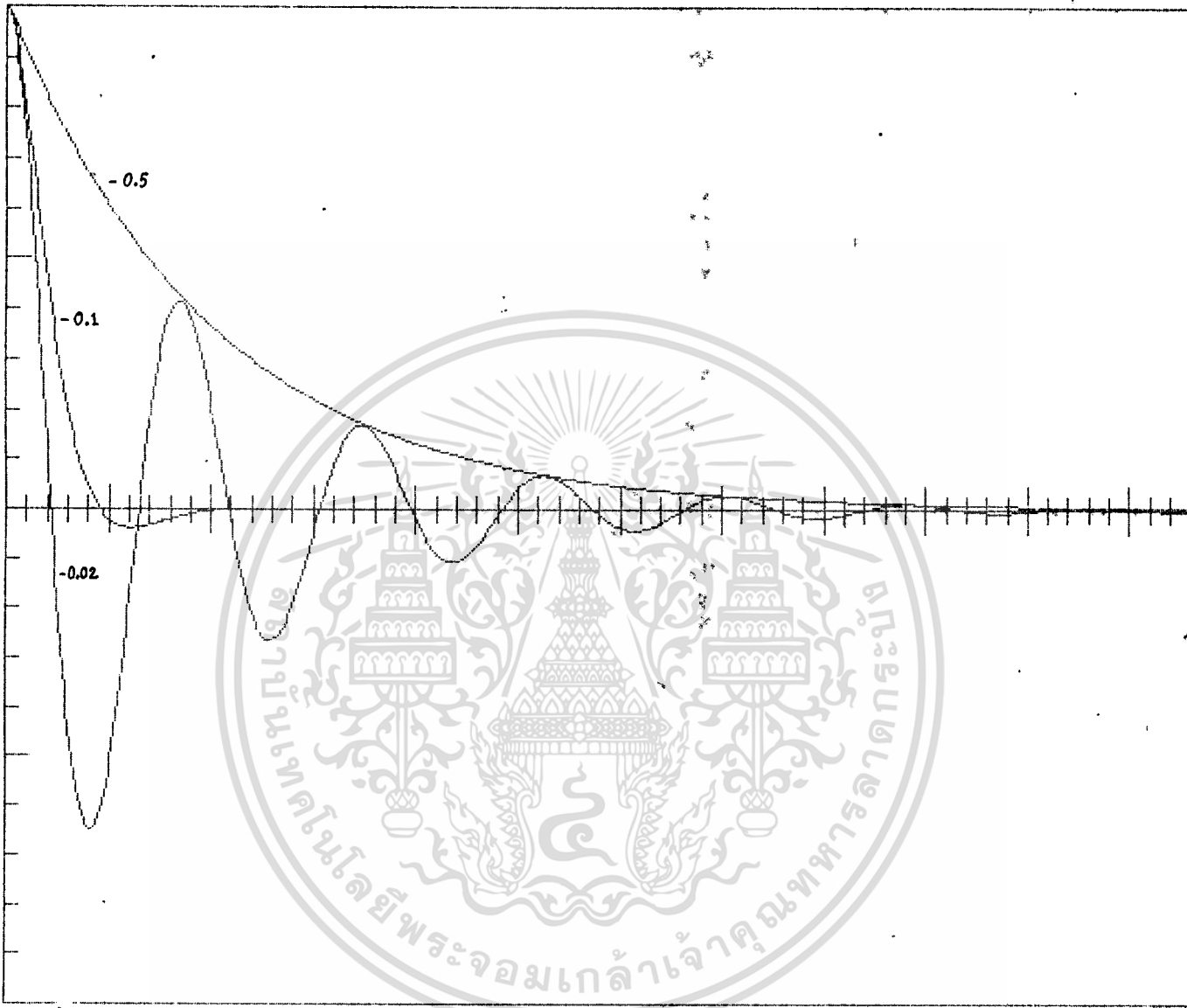
$$B = 0.0$$

$$A = E = 10 \text{ เมตร}$$

ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร



ภาพที่-9 แสดงผลการคำนวณ สมการ 3.3 โดยไร พารามิเตอร์ ดังนี้  
 $V = 100$  เมตร ต่อ วินาที  
 $T = \Delta t = 0.01$  วินาที  
 $K = k = -0.02$   
 $B = \beta = -.01, -.02, -.004$   
 $A = H = 10$  เมตร  
 ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร



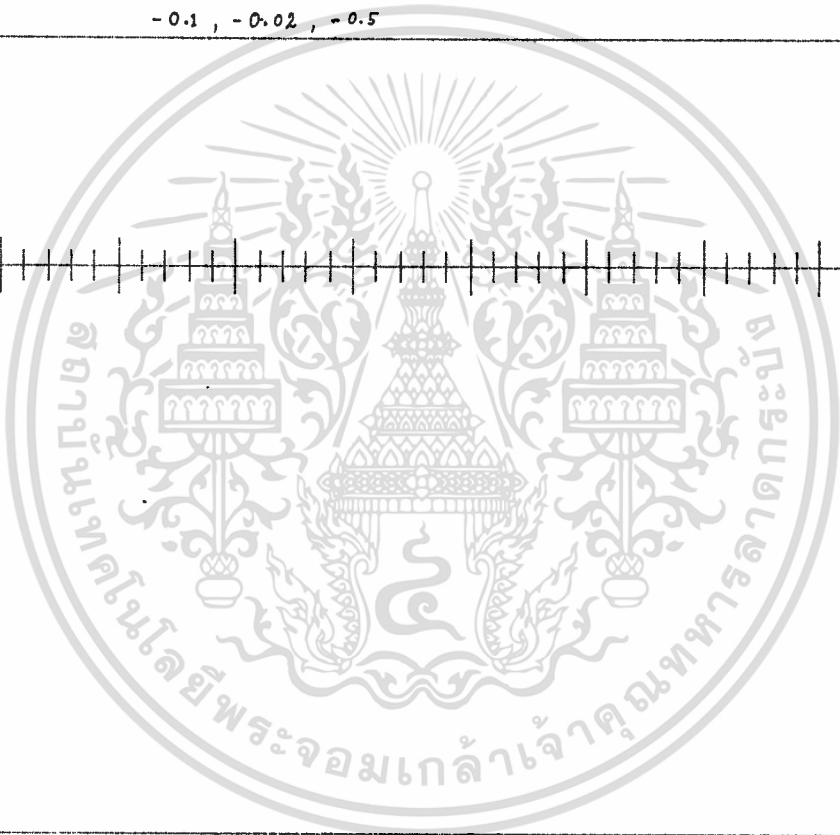
ภาพที่-10 แสดงผลการคำนวณ สมการ 3.3 โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้

- V = 100 เมตร ต่อ วินาที
- T =  $\Delta t$  = 0.01 วินาที
- K = k = -0.5
- B =  $\beta$  = -0.5, -0.1, -0.02
- A = E = 10 เมตร
- ระยะทางตลอดคนวนรอบ 600 เมตร

- 0.1 , - 0.02 , - 0.5

- 0.1 , - 0.02 , - 0.5

- 0.1 , - 0.02 , - 0.5



ภาพที่-11 แสดงผลการคำนวณ สมการ 3.3 โดยใช้ ทารามิเตอร์ ดังนี้

- V = 100 เมตร ต่อ วินาที
- T = 0.01 วินาที
- K = k = 0.0
- B = -0.1, -0.02, -0.5
- A = B = 4, 5, 6 เมตร ตามลำดับ
- ระยะทางตลอดแนวรอบ 600 เมตร

พิจารณาจากผลการคำนวณ สมการ 3.3 ใน ภาพที่-7 ถึง ภาพที่-11 พอสรุปย่อ  
ได้คือ

จาก ภาพที่-7 และ ภาพที่-8 แสดงให้เห็นว่าค่า  $\mu$  มีผลโดยตรงต่อความถี่ของ  
วิถีจรรวทที่วถวนไปมา

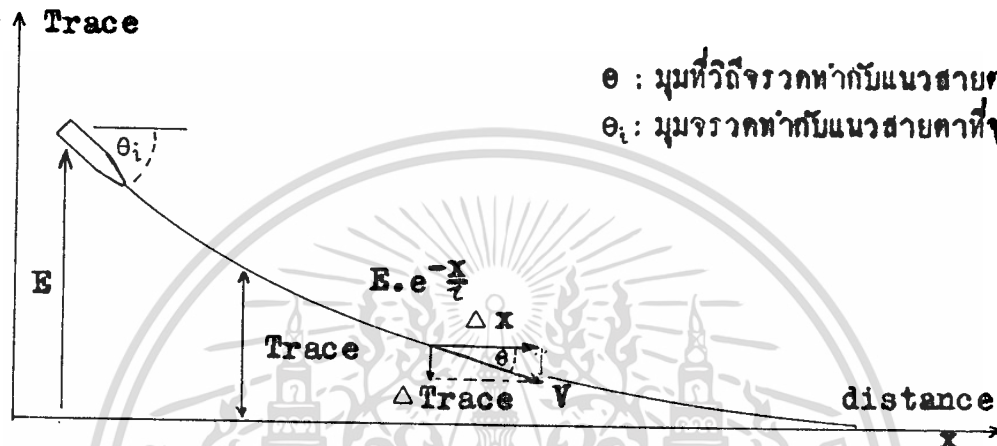
ภาพที่-9 และ ภาพที่-10 แสดงให้เห็นคุณสมบัติของ พารามิเตอร์  $\beta$  ซึ่งเมื่อค่า  
เพิ่มขึ้นจะทำให้วิถีจรรวทที่วถวน damp ลงได้ก็

ภาพที่-11 แสดงให้เห็นว่าค่า  $\beta$  จะไม่มีผลโดยตรงต่อการ เปลี่ยนวิถีของจรรวท

กล่าวโดยสรุปได้ว่า ค่า  $\mu$  เป็นค่าคงตัวควบคุมการ เปลี่ยนทิศทาง ส่วนค่า  
เป็นค่าคงตัวdamping ความวถวนของวิถีจรรวท(หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า  $\beta$  เป็น  
ค่าคงตัวคาคการถวองหนาสำหรับารควบคุม กังจะโคกกล่าวถึงในบทต่อไป)

บทที่ 4  
ศึกษาระบบนำวิถีโดยใช้คณิตศาสตร์ต่อเนื่อง

- 4.1 เนื่องจาก สมการ 3.4 ยุ่งยากกับการหารูปแบบของค่าตอบในทางคณิตศาสตร์ จึงโคหันไปใช้แนวทางใหม่ โดยกำหนดค่าตอบที่ต้องการขึ้นมาก่อน แล้วจึงพิจารณาหา พังกชัน ของการควบคุม



$\theta$  : มุมที่วิถีจรวกเท่ากับแนวสายตา

$\theta_i$  : มุมจรวกเท่ากับแนวสายตาที่จุดเริ่มต้น

ภาพที่-12 แสดงวิถีจรวกเข้าสู่แนวสายตาเป็น พังกชัน (เป้าหมายไม่เคลื่อนที่)

ทั้งนี้แสดงใน ภาพที่-12 กำหนดรูปร่างของวิถีจรวกที่ต้องการ ให้เป็น พังกชัน แบบลดลงของ exponential จะเขียนสมการ (โดยเป้าหมายไม่เคลื่อนที่) ได้ดังนี้

$$\text{Trace} = E.e^{-\frac{x}{\tau}} \quad \tau: \text{ค่าคงตัวใดๆ} \quad 4.1$$

differentiate สมการ 4.1

$$\frac{d\text{Trace}}{dx} = -\frac{1}{\tau}E.e^{-\frac{x}{\tau}} \quad 4.2$$

จาก ภาพที่-12 จะหาค่ามุม  $\theta$  ได้เป็น

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d\text{Trace}}{dx}$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \left( -\frac{1}{\tau}E.e^{-\frac{x}{\tau}} \right) \quad 4.3$$

ในกรณีที่ มุม  $\theta < 20^\circ$  (0.36 radian) ซึ่งเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ฟังก์ชัน  $\tan^{-1}$  เขียนเป็น linear transfer function ได้ และเขียน สมการ 4.3 ใหม่ได้เป็น

$$\theta = \beta \left( -\frac{1}{\tau} E \cdot e^{-\frac{x}{\tau}} \right) \quad 4.4$$

$\beta$  :  $\tan^{-1}$  transfer constant

หรือ

$$\theta = \beta \frac{d\text{Trace}}{dx} \quad 4.5$$

diff สมการ 4.4

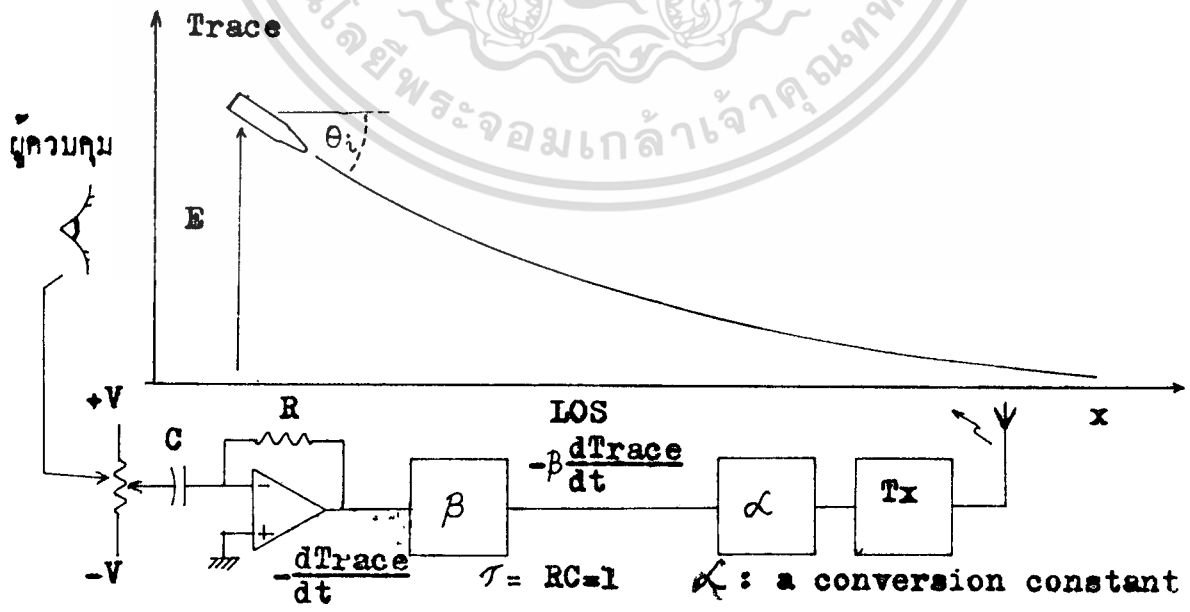
จะได้ว่า

$$\frac{d\theta}{dx} = -\beta \left( -\frac{1}{\tau} E \cdot e^{-\frac{x}{\tau}} \right) = \omega \quad 4.6$$

$$\omega = -\beta' \frac{d\text{Trace}}{dx} \quad \beta' = \beta/\tau \quad 4.7$$

สมการ 4.7 เป็นสมการของการควบคุมวิถี ( $\omega$  ความเร็วเชิงมุมของจรวดแปร โดยตรงกับคำสั่ง -บทที่ 3) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ดังแสดงใน ภาพที่-13 แต่ สมการ 4.11 จะใช้งานได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อ มุมเริ่มต้นของจรวด  $\theta$  initial มีค่าถูกต้อง ดังจะหาได้จาก สมการ 4.3 เป็น

$$\theta \text{ initial} = \tan^{-1}(-\tau E) \quad 4.8$$



ภาพที่-13 แสดงระบบควบคุมตาม สมการ 4.7

คงที่ได้ทำการสมมุติไปแล้ว เพื่อสร้าง สมการ 4.4 ให้  $\theta < 20^\circ$  ในทำนองเดียวกัน จะสมมุติให้ ระยะทาง  $x$  แปรโดยตรงกับเวลา  $t$  ทั้งนี้เนื่องจากในทางปฏิบัติ  $E \ll x_T$   $x_T$ : ระยะทางถึงเป้าหมาย โดยใช้ conversion constant  $\propto$  ที่เหมาะสม ระบบ ที่แสดงไว้ใน ภาพที่-13 จะเป็นไปตาม สมการ 4.7 ได้ ( $d/dx \Rightarrow d/dt$ )

ในทางปฏิบัติ การหาค่ามุม  $\theta_{initial}$  อาจทำได้ไม่สะดวก และคาดคะเนเคลื่อนต่างๆ ซึ่งเกิดจากกลไกหรือผู้ควบคุมการยิงเอง อาจทำให้ สมการ 4.7 อยู่ในสภาวะคงที่ต่อไปนี้ได้

$$\omega = -\beta \frac{dTrace}{dt} = 0 \quad \text{โดยที่} \quad Trace = \text{constant} \neq 0$$

ซึ่งหมายความว่า วิถีจรวดจะวิ่งขนานกับแนวสายตา แต่ไม่เข้าสู่เป้าหมาย

#### 4.2 คำจำกัดความสำหรับการควบคุม

คงได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ระบบที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถใช้งานได้ในทางปฏิบัติ จึงได้ให้คำจำกัดความใหม่สำหรับการควบคุม ระบบแนวสายตา ดัง สมการ 4.9

$$k \cdot Trace = \frac{dTrace}{dt} \quad 4.9$$

k: คาคงตัวใดๆ

กล่าวคือให้อัตราเข้าสู่แนวสายตา แปรผัน(นคูณ)กับระยะห่างระหว่างวิถีจรวดกับแนวสายตา ในกรณีที่ให้ k มีค่าลบ Trace จะลดลงสู่แนวสายตาเป็น exponential ดังแสดงไว้ดังต่อไปนี้

สมมุติให้  $Trace = E \cdot e^{-\frac{x}{L}}$

และจาก สมการ 4.9

$$k \cdot Trace = \frac{dTrace}{dt} \approx \frac{dTrace}{dx}$$

(สมมุติฐานเกี่ยวกับที่ใช้ใน หัวข้อ 4.1 ข้างบน)

จะได้ว่า

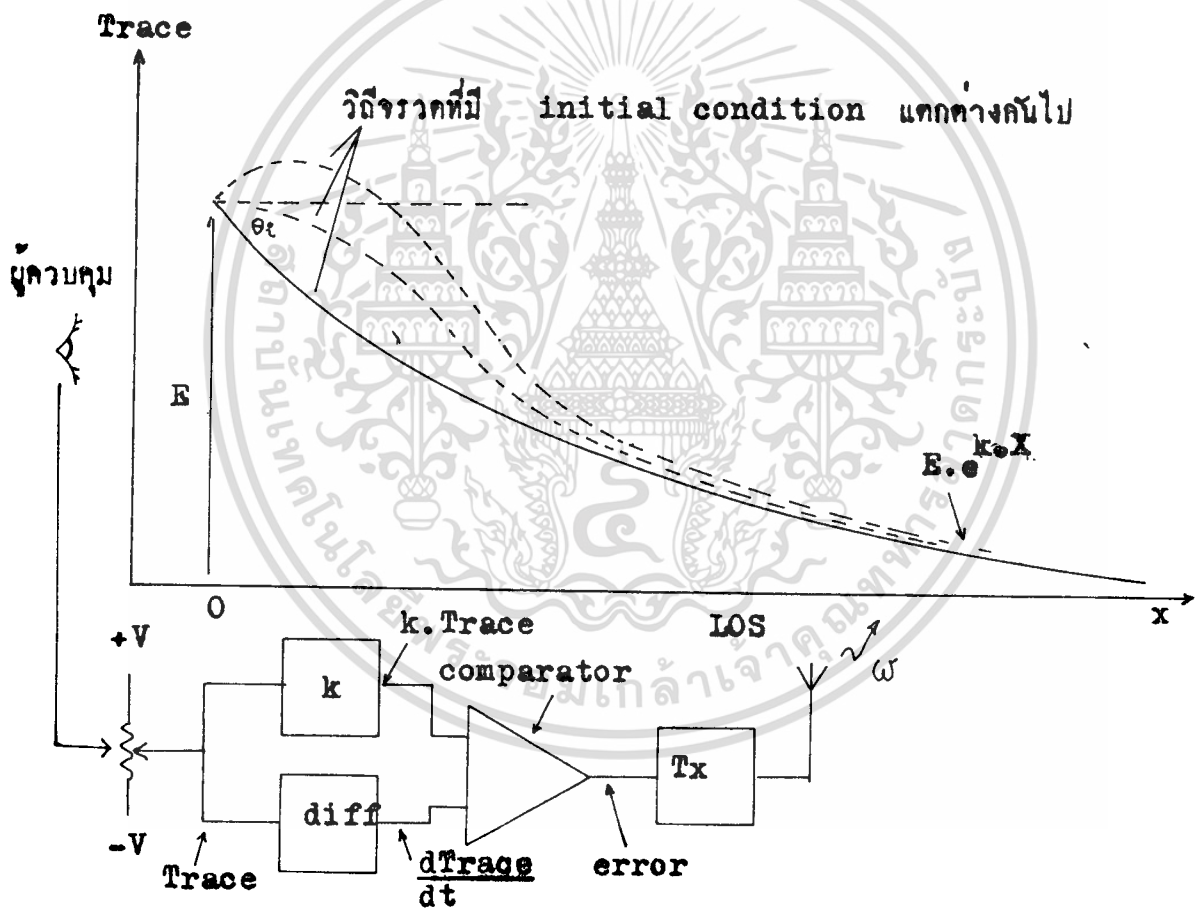
$$\begin{aligned} k \cdot E \cdot e^{-\frac{x}{L}} &= -\frac{1}{L} E \cdot e^{-\frac{x}{L}} \\ k &= -\frac{1}{L} \end{aligned}$$

นั่นคือ

หรืออีกนัยหนึ่ง การควบคุมในลักษณะนี้จะให้วิถีจรวกเป็น

$$\text{Trace} = E \cdot e^{k \cdot X} \quad 4.10$$

อนึ่งในช่วงต้นๆของวิถี ในทางปฏิบัติอาจไม่เป็นไปตาม สมการ 4.10 ถ้า initial condition ไม่ถูกต้อง



ภาพที่-14 แสดงระบบควบคุมตาม สมการ 4.9

พิจารณาจาก ภาพที่-14 ที่ comparator output จะเห็นว่า

$$\text{Error} = \omega$$

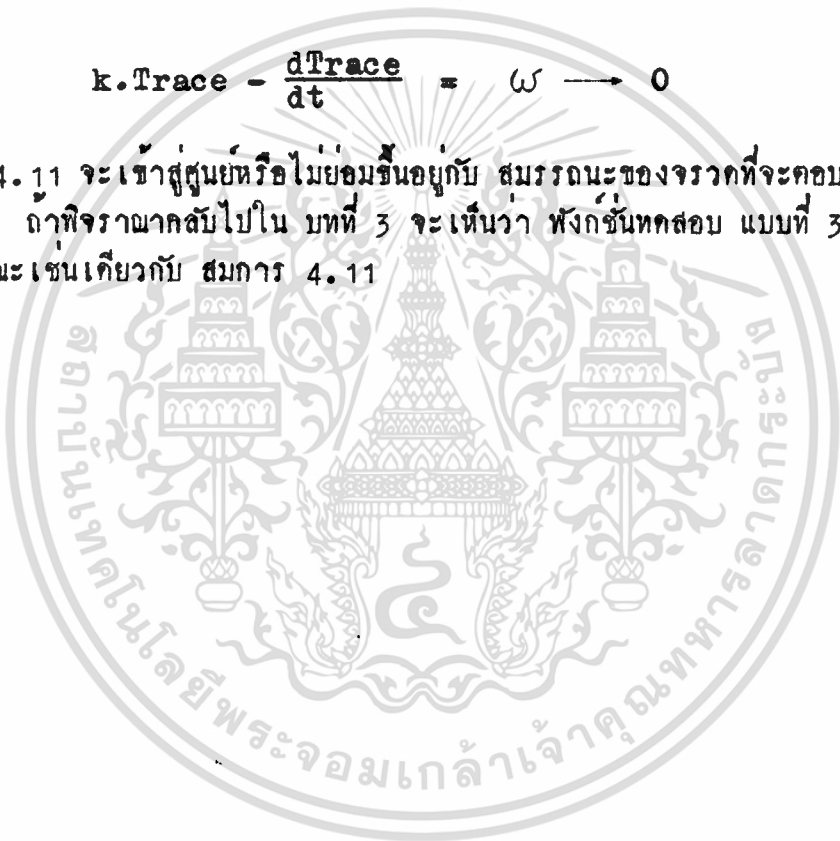
จาก สมการ 4.9

$$0 = k \cdot \text{Trace} - \frac{d\text{Trace}}{dt}$$

ซึ่งไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ เขียนสมการของทางปฏิบัติจริงได้เป็น

$$k \cdot \text{Trace} - \frac{d\text{Trace}}{dt} = \omega \rightarrow 0 \quad 4.11$$

สมการ 4.11 จะเข้าสู่ศูนย์หรือไม่ขึ้นอยู่กับ สมรรถนะของจรวดที่จะตอบสนอง  
ต่อคำสั่ง ( $\omega$ ) ถ้าพิจารณากลับไป ใน บทที่ 3 จะเห็นว่า ฟังก์ชันทดสอบ แบบที่ 3.3 ที่ได้  
สมมุติขึ้น มีลักษณะเช่นเดียวกับ สมการ 4.11



บทที่ 5  
คำนวณวิถีจรวดโดยใช้คณิตศาสตร์ Laplace (Laplace model)

ความที่ไถ่กล่าวแล้วใน บทที่ 4 สมการ 4.13 ไม่สามารถเป็นจริงไถ่ตลอดเวลา  
 กิ่งนั้นใน บทที่ 5 นี้จะเป็นการสร้ารูปแบบทั้งหมดของระบบรวมทั้งไถ่จรวดด้วย โดยใช้  
 วิชาคณิตศาสตร์ Laplace เพื่อให้สามารถคำนวณวิถีจรวดไถ่โดยละเอียด

5.1 โดยใช้ถื่ถื่ถื่ สมการ 4.11 บทที่ 4 และนำมาเขียนใหม่เป็นพอร์มทั่วไป

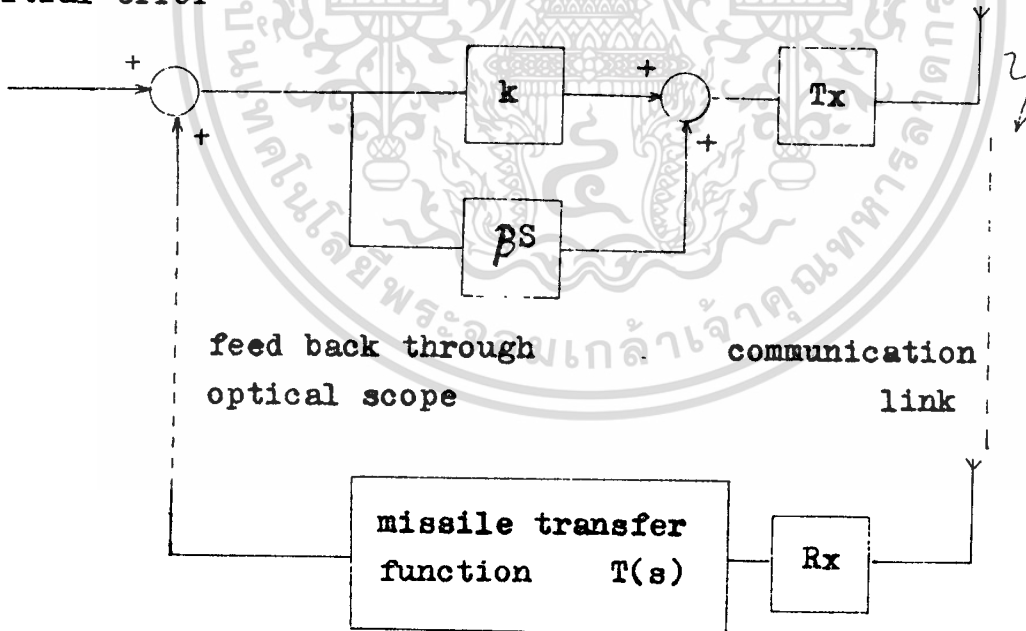
$$\omega = k \cdot \text{Trace} + \beta \cdot \frac{d\text{Trace}}{dt} \quad 5.1$$

เปลี่ยนสมการให้้อยู่ใน S-plane

$$\omega(s) = k \cdot \text{Trace} + \beta S \cdot \text{Trace} \quad 5.2$$

สมการ 5.2 เขียนเป็นแผนผังของระบบไถ่จรวดแสดงใน ภาพที่-15

initial error



ภาพที่-15 แสดงแผนผังของระบบตาม สมการ 5.2

จาก สมการ 3.4

$$\text{Trace} = E + \int_0^t V \cdot \sin\left(\int_0^t \omega dt\right) dt$$

E เป็น initial error คงนั้นจะเขียนเทอมขวามือสุดได้ว่า

$$\text{วิธีจรวกคอบสนอง} = \int_0^t V \cdot \sin\left(\int_0^t \omega dt\right) dt$$

และเขียนเป็น S-plane transfer function ได้เป็น

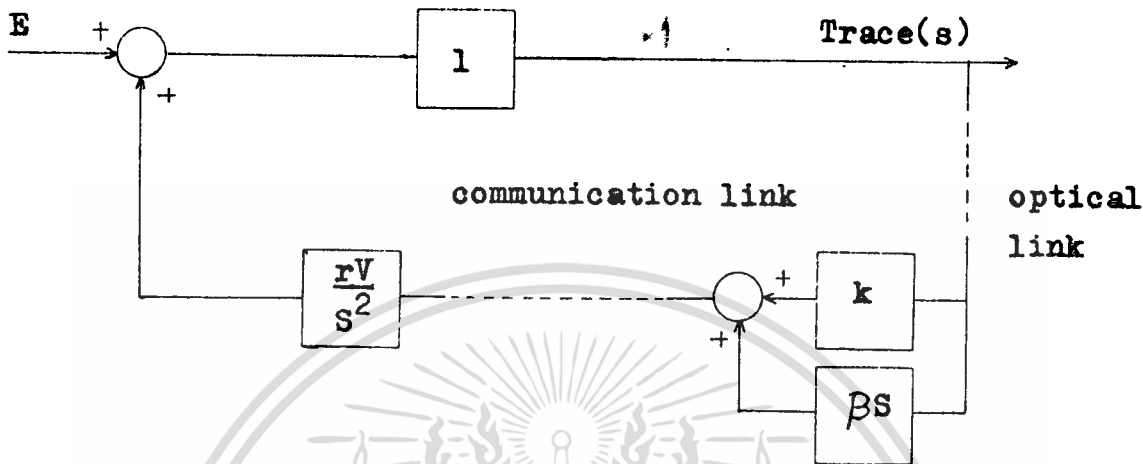


ภาพที่-16 แสดง S-plane transfer function ของจรวก

จาก ภาพที่-16 sin function เป็น nonlinear transfer function โดยใส่สมมุติฐานเกี่ยวกับที่ใช้ใน บทที่ 4 สมการ 4.4 มุม  $\theta$  มีค่าน้อย เราจะประมาณ sin function เป็น linear transfer function(r) ได้ ( $-\text{1rad} < \theta < +\text{1rad}$ ;  $r = 0.94$ ) แล้วเขียน transfer function ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\text{Trace}}{\omega} = \frac{r \cdot V}{s^2} \quad 5.3$$

และเขียนรูปแบบใน S-plane ได้ดังแสดงใน ภาพที่-17



ภาพที่-17 แสดงรูปแบบใน S-plane ของระบบควบคุม

จาก ภาพที่-17 เขียน close loop transfer function ได้เป็น

$$T(s) = \frac{A}{1 - A\beta} = \frac{1}{1 - \frac{(k+\beta s)rV}{s^2}} = \frac{s^2}{s^2 - rV(k+\beta s)} \tag{5.4}$$

A : open loop transfer function  
 β : feedback transfer function

เพื่อคำนวณหาวิถีจรรอก (Trace) จึงได้สมมุติ สัญญาณเข้าให้เป็น step function คือ

สัญญาณเข้า  $\longrightarrow E \cdot u(t) \longrightarrow \frac{E}{s}$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Trace}(s) &= \frac{E}{s} \cdot \frac{s^2}{s^2 - rV(k+\beta s)} \\ &= \frac{E(s - r\beta V/2) + E(r\beta V/2)}{s^2 - r\beta V s + (r\beta V/2)^2 - rV k - (r\beta V/2)^2} \\ &= \frac{E(s - r\beta V/2) + E(r\beta V/2)}{(s - r\beta V/2)^2 - [rV k + (r\beta V/2)^2]} \end{aligned}$$

แปลงกลับให้อยู่ใน plane ของเวลา (t) จะได้

$$\text{Trace}(t) = E \cdot e^{(r\beta V/2)t} (\cosh at + \frac{r\beta V}{2a} \sinh at) \quad 5.5$$

$$a = \sqrt{rV k + (r\beta V/2)^2}$$

พิจารณา สมการ 5.5 ค่า  $a$  อาจจะเป็นได้ทั้งค่าจริง และค่าจินตนาการ ถ้า  $a$  เป็นค่าจริง จะทำการคำนวณวิถีได้จาก สมการ 5.5 โดยตรง ในกรณีที่  $a$  เป็นค่าจินตนาการ เขียนสมการ 5.5 ได้ใหม่เป็น

$$\text{Trace}(t) = E \cdot e^{(r\beta V/2)t} (\cos at + \frac{r\beta V}{a} \sin at) \quad 5.6$$

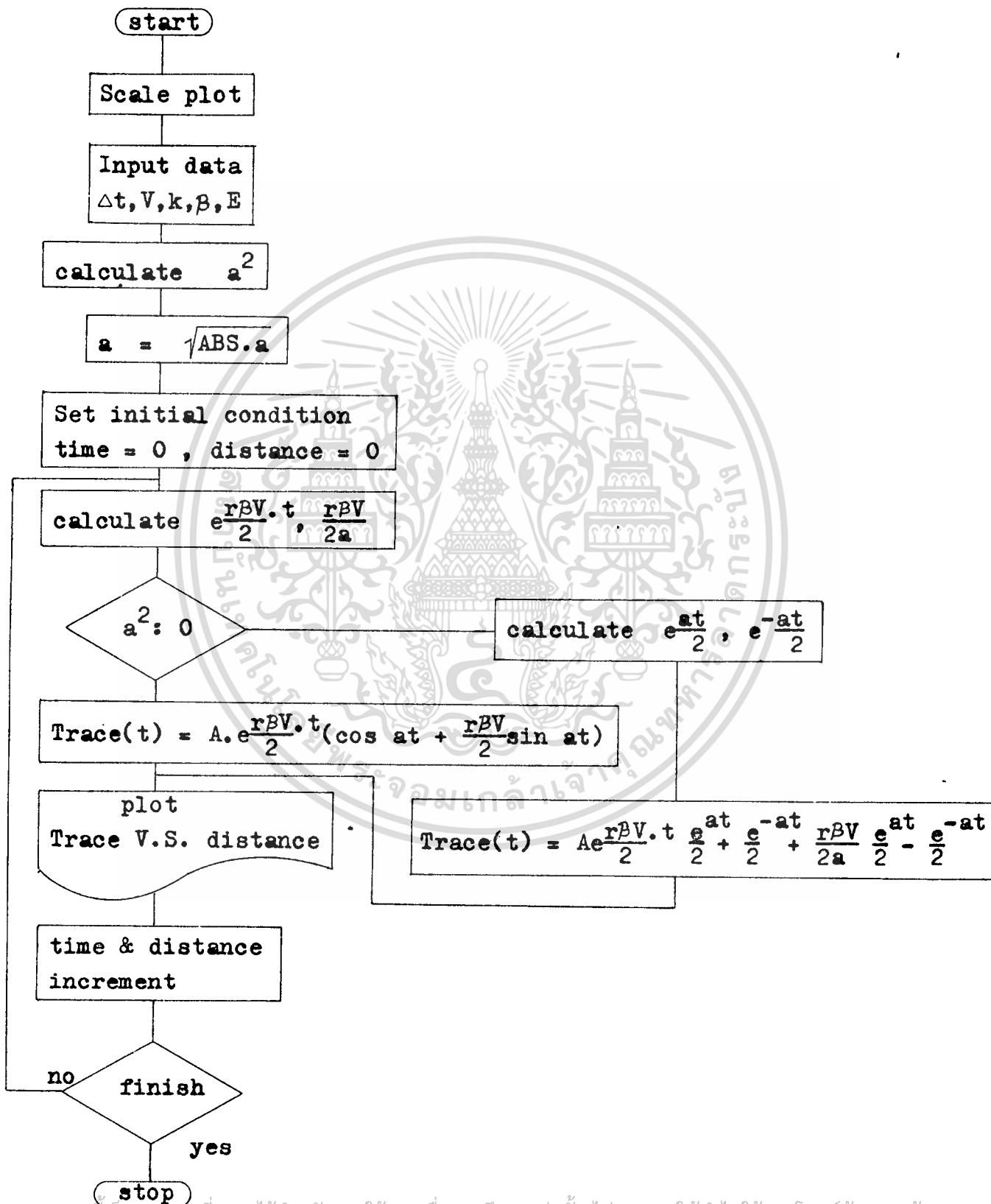
สมการ 5.5 และ สมการ 5.6 แสดงให้เห็นรูปแบบของวิถีจรวดไขว้กันชัดเจน กล่าวคือ ถ้า  $\beta$  มีค่าลบวิถีจรวดซึ่งเป็น periodic function จะค่อยๆ ลดลงสู่แนวสายตาเป็น exponential form ภายหลัง  $\exp(-r\beta V/2)t$  และในกรณีที่ค่า  $\beta = 0$  และ  $k$  มีค่าเป็นลบ สมการ 5.5 และ สมการ 5.6 จะลดลงเป็น

$$\text{Trace}(t) = E \cdot \cos(\sqrt{|rV k|} t) \quad 5.7$$

จะเห็นได้ว่า สมการ 5.7 เป็น periodic function ที่มีขนาดคงที่ไปตลอด ซึ่งเป็นรูปแบบของการควบคุมวิถีที่ไม่มีการคาดการณ์ล่วงหน้า จึงกล่าวได้ว่า  $\beta$  เป็น ค่าคงตัวคาดการณ์ (prediction factor) หรือ damping factor และ  $k$  เป็นค่าคงตัวในการเปลี่ยนทิศทาง steering factor

5.2 การคำนวณ สมการ 5.5 และ สมการ 5.6 โดยใช้เครื่องคำนวณ HP - 45

แสดงไว้ใน ภาพที่-18 ถึง ภาพที่-23 ตามลำดับ

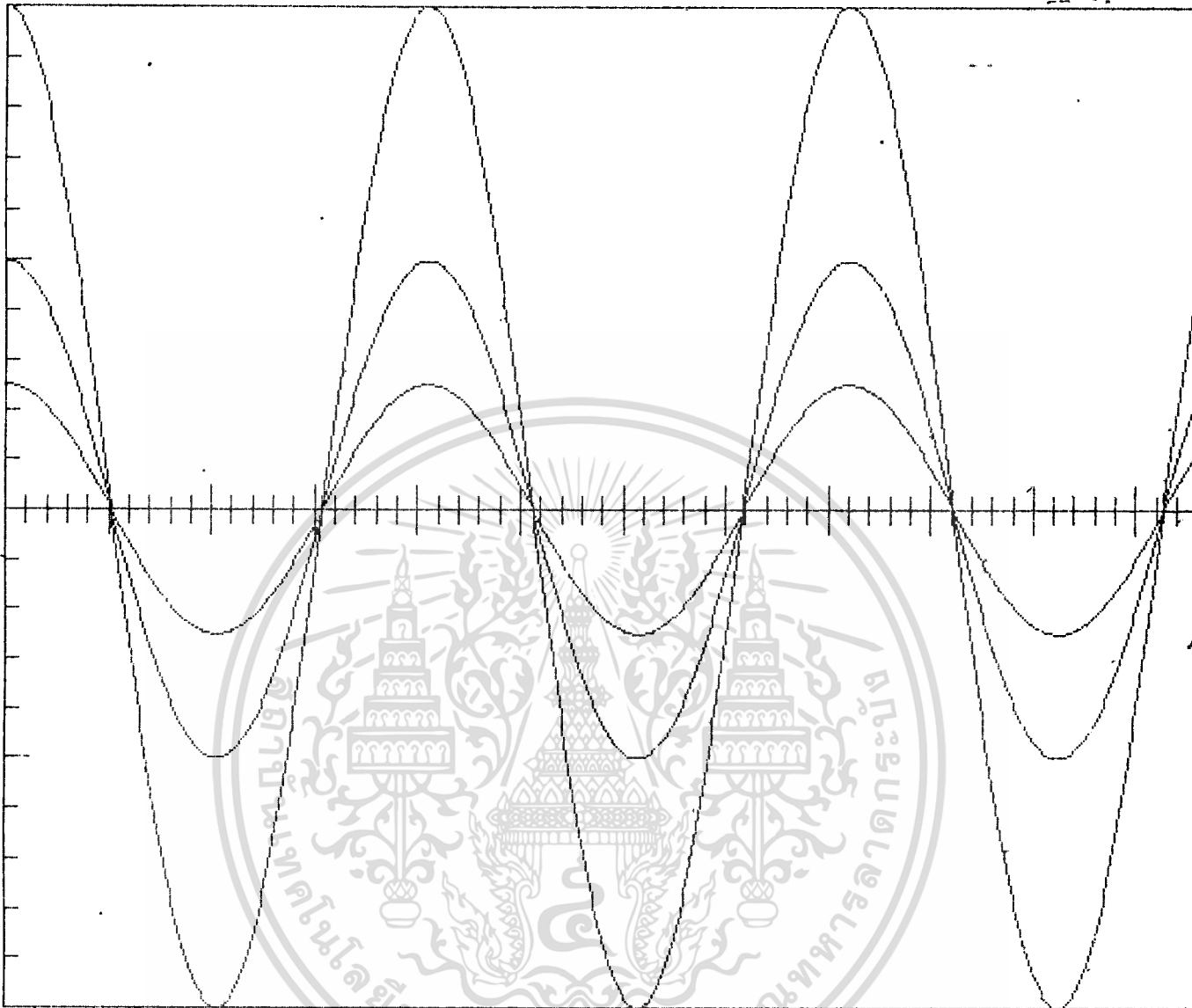


```

10 PLOTTER IS 13,"GRAPHICS"
15 GRAPHICS
20 SCALE 0,600,-10,10
25 AXES 10,1,0,0,5,5,5
30 FRAME
40 INPUT V,A,K,B
50 I=.941*V*B/2
60 C=.941*V*K
70 D=C+I^2
80 E=ABS(D)
90 F=SQR(E)
100 FOR X=0 TO 600
110 G=EXP(I*X/100)
120 IF D<0 THEN GOTO 170
130 H=EXP(F*X/100)/2
140 J=EXP(-F*X/100)/2
150 L=A*G*(H+J+I*H/F-I*J/F)
160 GOTO 200
170 M=COS(F*X/100)
180 N=SIN(F*X/100)/F
190 L=A*G*(M+I*N)
200 PLOT X,L,1
210 NEXT X
220 Y=Y+1
230 IF Y=3 THEN GOTO 250
235 PLOT 5,5,-2
240 GOTO 40
250 END

```

ภาพที่-19 แสดงโปรแกรมคำนวณ สมการ 5.15 และ สมการ 5.16 สำหรับ  
เครื่องคำนวณ HP - 45



ภาพที่-20 แสดงผลการคำนวณ โคโยไซ ทารามีเคอร์คังนี้

$$V = 100 \text{ เมตร ต่อ วินาที}$$

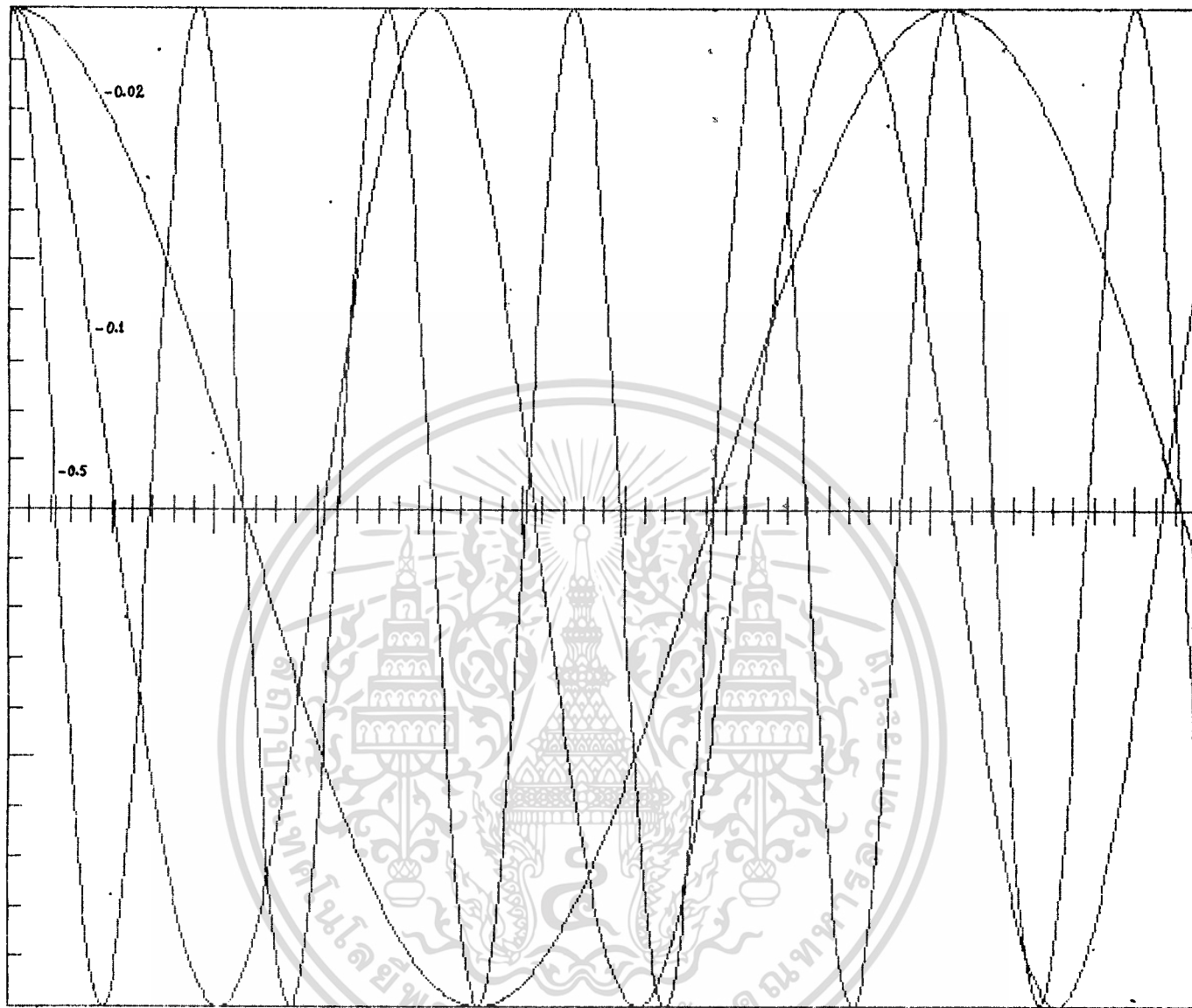
$$T = \Delta t = 0.01 \text{ วินาที}$$

$$K = k = -0.1$$

$$B = \beta = 0.0$$

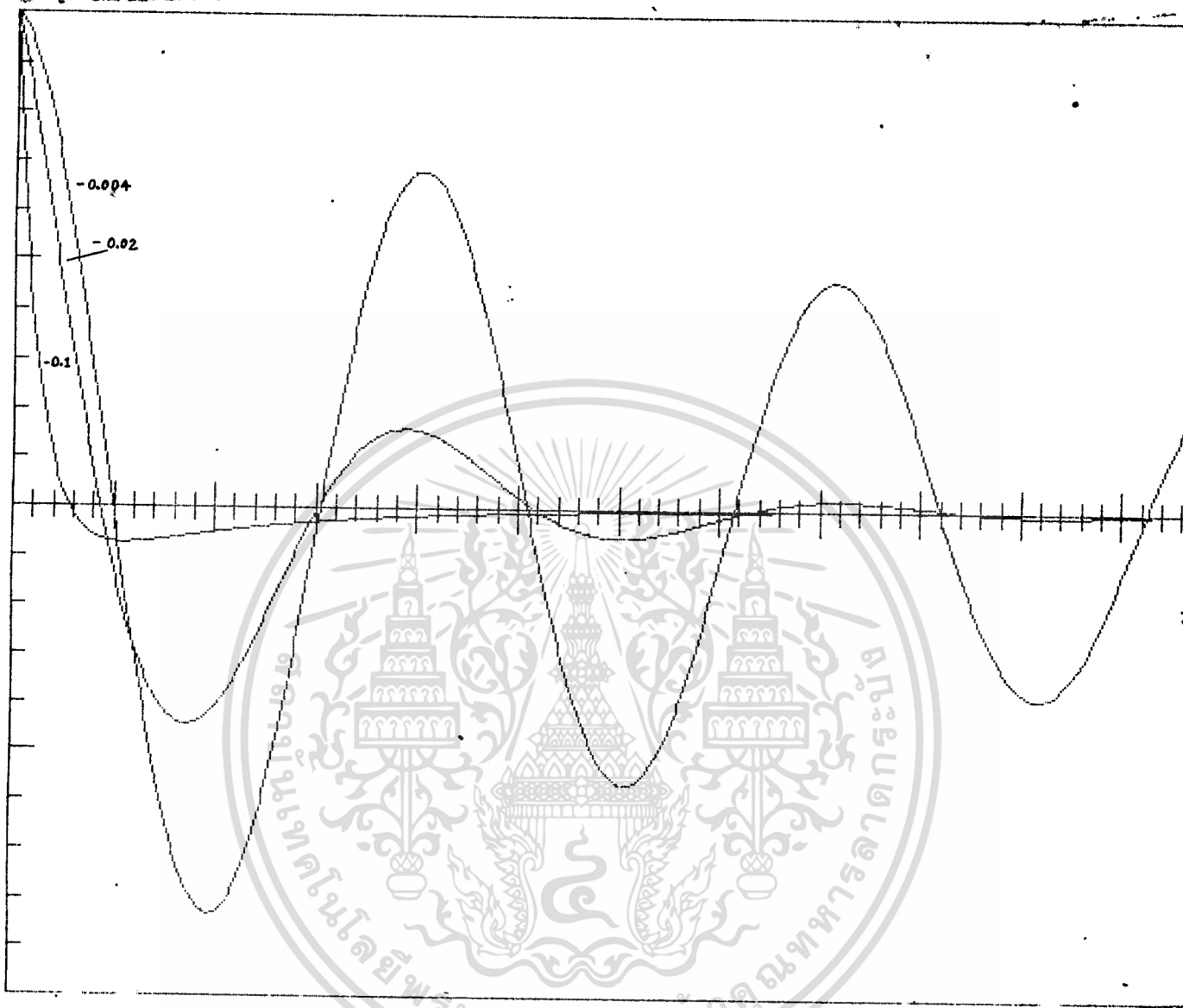
$$A = E = 10, 5, 2.5 \text{ เมตร ตามลำดับ}$$

$$\text{ระยะทางคอคอกแนวนอน } 600 \text{ เมตร}$$



ภาพที่-21 แสดงผลการคำนวณ โคโยใช้ พารามิเตอร์ดังนี้

- V = 100 เมตร ต่อ วินาที
- T =  $\Delta t$  = 0.01 วินาที
- K = k = -0.5, -0.1, -0.02 ตามลำดับ
- B =  $\beta$  = 0.0
- A = E = 10 เมตร
- ระยะทางตลอดความถี่ 600 เมตร



ภาพที่-22

แสดงผลการคำนวณ โคไซน์ พารามิเตอร์ ดังนี้

$V = 100$  เมตร ต่อ วินาที

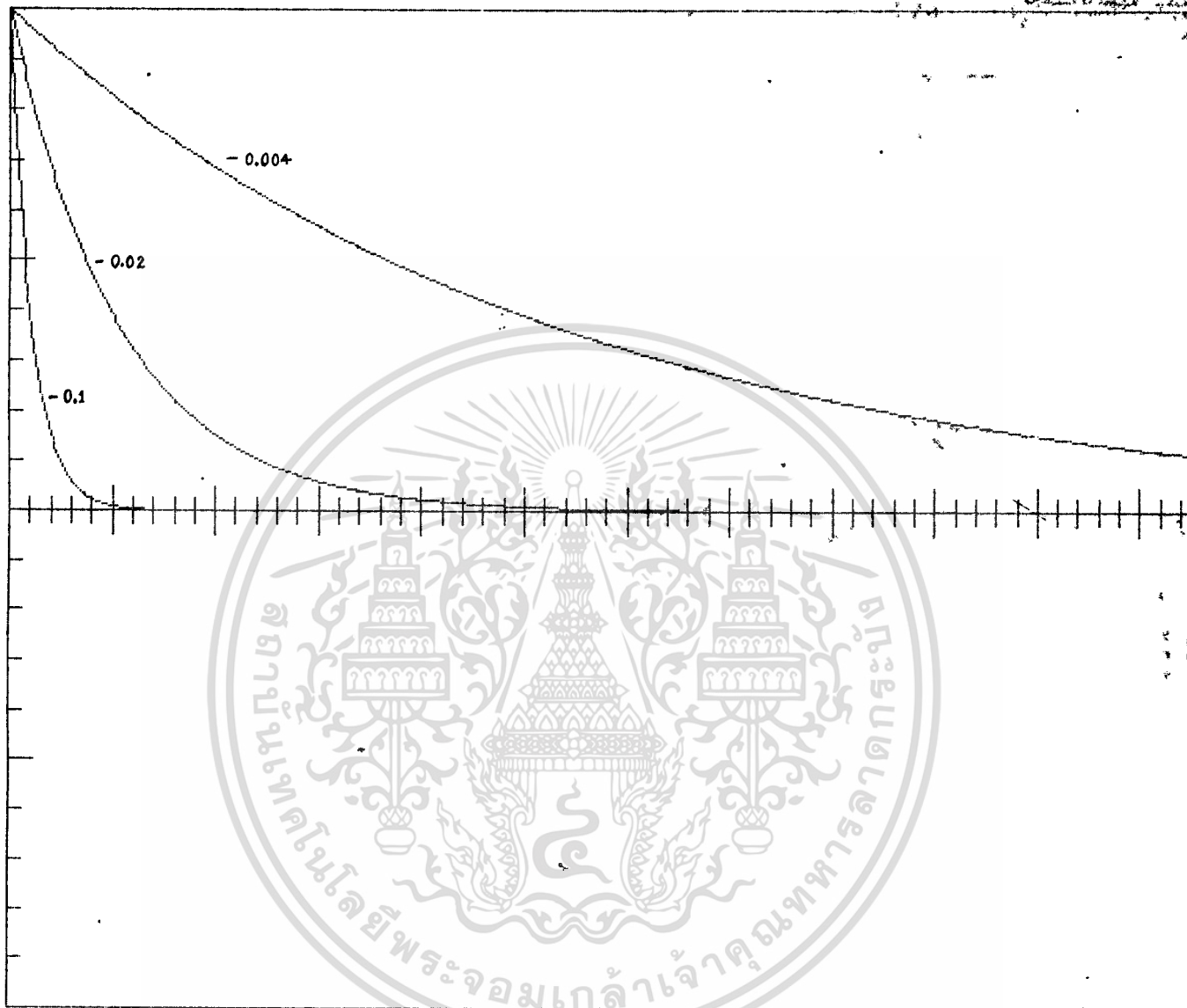
$T = \Delta t = 0.01$  วินาที

$K = k = -0.1$

$B = \beta = -0.1, -0.02, -0.004$  ตามลำดับ

$A = E = 10$  เมตร

ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร



ภาพที่-23 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้

$V = 100$  เมตร ต่อ วินาที

$T = \Delta t = 0.01$  วินาที

$K = k = 0.0$

$B = \beta = -0.1, -0.02, -0.004$  ตามลำดับ

ระยะทางตลอดจำนวนชน 600 เมตร

ผลการคำนวณไม่ได้ออกต่างไปจากที่คำนวณได้ใน บทที่ 3 แต่อย่างใด ยังคงให้ ผลที่แสดงถึง  $\mu$  เป็นค่าคงตัวในการเปลี่ยนทิศทาง และ  $\beta$  เป็นค่าคงตัวค่าการผัน ความเค็ม แต่ค่าสังเกตจาก ภาพที่-23 ซึ่งค่าคงตัวการเปลี่ยนทิศทาง  $\mu$  มีค่าเป็นศูนย์ แต่วิถีจรวดก็เข้าสู่แนวสายคาโค แต่กรณีเดียวกันนี้ใน บทที่ 3 วิถีจรวดไม่เข้าสู่แนวสายคา ทังนี้เนื่องจาก สถานะของสัญญาณเข้เริ่มต้น (input function) แยกต่างกับ กธาวคือ สถานะของสัญญาณเริ่มต้นใน บทที่ 3 เป็นระดับคงตัว (ค่าคลาดเคลื่อนเริ่มต้น สมมุติ) ส่วนใน บทที่ 5 นี้สถานะของสัญญาณเริ่มต้นได้สมมุติให้เป็นสัญญาณเปลี่ยนระดับทันที (step function) โดยมีขนาดของสัญญาณเท่ากับขนาดของค่าคลาดเคลื่อนเริ่มต้นสมมุติ สำหรับในการปฏิบัติจริงกรณีนี้ที่แสดงไว้ใน ภาพที่-23 วิถีจรวดอาจไม่เข้าสู่แนวสายคาโค เนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนของระบบกลไกที่ใช้ และความผิดพลาดเล็กน้อยๆของ ผู้ควบคุมการยิง ซึ่งเป็นสถานการณ์คล้ายคลึงกับที่ได้แสดงไว้โดย สมการ 4.8

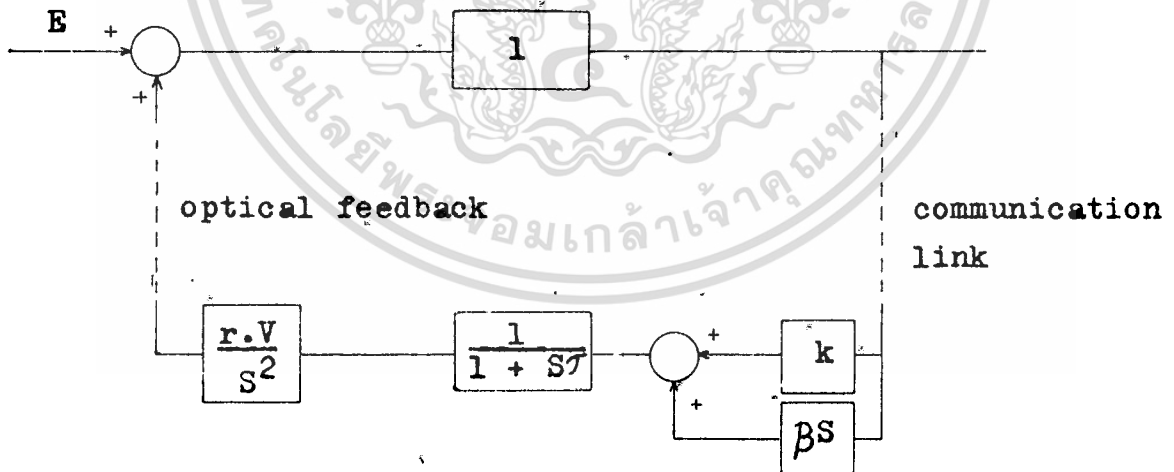
บทที่ 6  
ศึกษาผลของ การหน่วงเหนี่ยว ความเร็ว และ  
ระยะทางที่เปลี่ยนไป

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลของ พารามิเตอร์ ต่างๆที่ได้ถูกสมมุติค่าไว้เพื่อความสะดวก ในการพิจารณากรณีต่างๆ คือ การหน่วงเหนี่ยวต่อคำสั่งของจรวด ความเร็วเป้าหมาย ความเร็วจรวดไม่คงที่ และมุมกระจายออกของกลองตึกตามเป้าหมาย

### 6.1 การหน่วงเหนี่ยวต่อคำสั่งของจรวด

ในทางปฏิบัติจรวดมีมวลสูง เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจึงเกิด โมเมนตัมค้ำย ซึ่งแน่นอน ที่จรวดจะมีแรงคอคทานกับการ เปลี่ยนทิศทางเนื่องจาก โมเมนตัมนี้

ค้ำยที่ไต่สมมุติไว้ใน บทที่ 3 และบทที่ 5 โดยให้ความเร็วเชิงมุมของจรวดเปลี่ยนแปลง โดยตรงและทันทีต่อคำสั่งที่ไต่รับ ( $\omega$ ) แต่ในทางปฏิบัติไม่ไต่เป็นเช่นนั้น (จะผิดไปมากหรือน้อยย่อมขึ้นอยู่กับ การออกแบบจรวด) จึงไต่สมมุติให้ผลของการหน่วงเหนี่ยวต่อคำสั่งอยู่ใน รูปของวงจรรองความถี่ต่ำ (low pass filter) และใช้ฟอร์ม Laplace ใน บทที่ 5 เขียนแผนผังของระบบไต่ค้ำย ภาพที่-24



ภาพที่-24 แสดงแผนผัง Laplace ที่มีเทอมหน่วงเหนี่ยวค้ำย

เขียน transfer function ได้เป็น

$$T(s)_{\text{loop}} = \frac{1}{1 - \frac{(k+\beta S) \cdot rV}{(1+ST) \cdot S^2}}$$

$$T(s) = \frac{S^2(1+ST)}{S^2(1+ST) - (k+\beta S) \cdot rV} \quad 6.8$$

สมการ 6.8 ค่อนข้างยุ่งยากในการแปลง (transform) กลับไปอยู่ใน time domain จึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้ low pass filter form เติมเข้าไปในโปรแกรม Numerical calculation และผลการคำนวณโดยเครื่องคำนวณ HP - 45 แสดงไว้ใน ภาพที่-25 ถึง ภาพที่-28 ตามลำดับ

พิจารณาจาก ภาพที่-27 และ ภาพที่-28 จะเห็นว่าผลที่เกิดจากการหน่วงเหนี่ยวต่อคำสั่งของจรวจคนั้นไม่ก่อให้เกิดวิบัติจรวจออกไปนอกแนวสายคา แต่ผลที่เกิดขึ้นคล้ายกับ ค่าคงตัวเปลี่ยนทิศทาง  $k$  ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงตัวหน่วงเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น มีผลให้วิบัติกววน (overshoot) น้อยลงและความถี่กววนคำสั่งควย ซึ่งตรงกับการทดลองเปลี่ยนค่าคงตัวเปลี่ยนทิศทางใน บทที่ 3

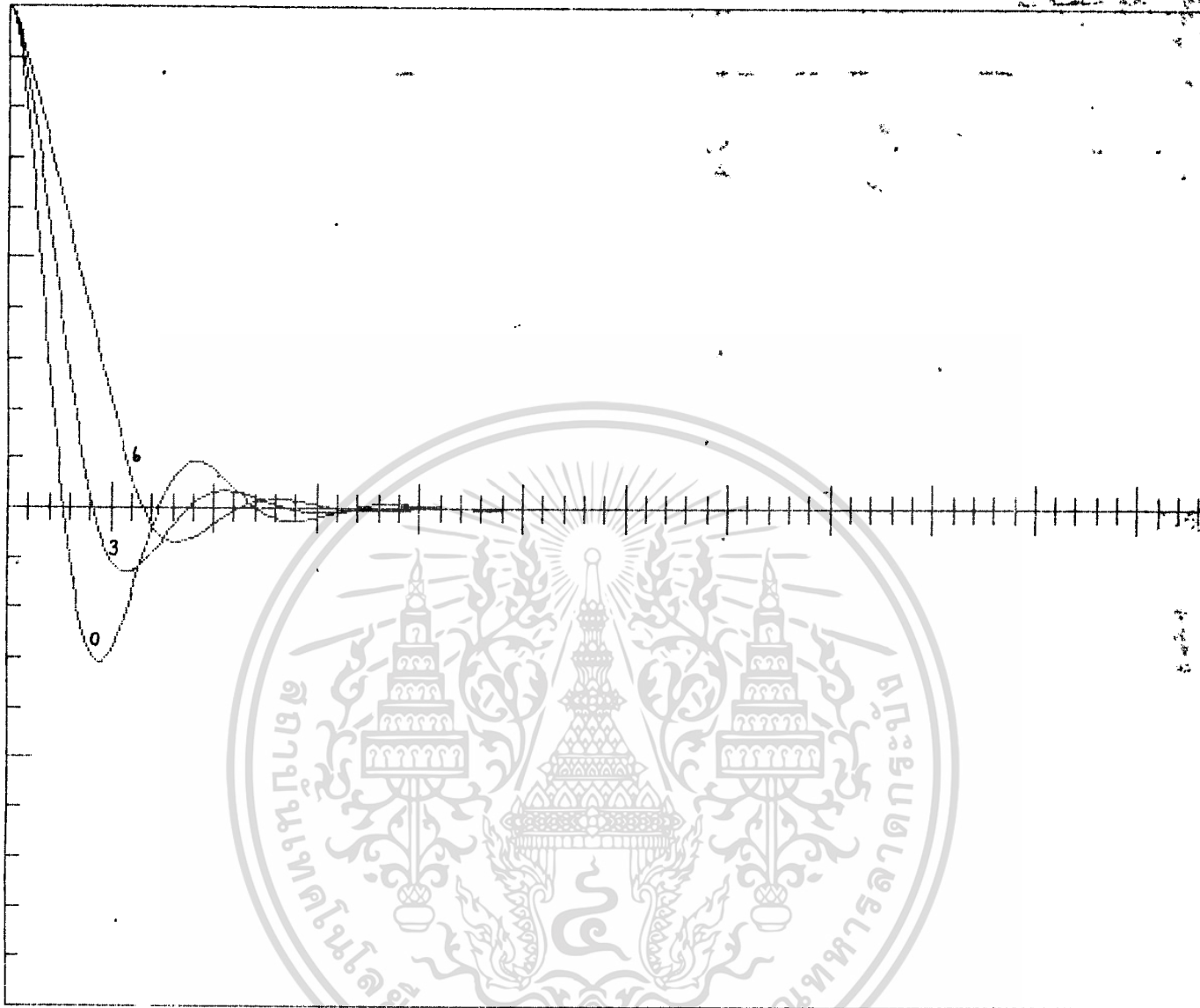
```

10 PLOTTER IS 13, "GRAPHICS"
15 GRAPHICS
20 SCALE 0,600,-10,10
25 AXES 10,1,0,0,5,5,5
30 FRAME
40 INPUT V,T,A,K,B,P
60 S=0
70 F=0
80 Z=0
90 R=0
100 V=V*T
110 K=K*T
140 C=A*K
150 D=F*B
160 R=(R+C+D)/(1+P*ABS(C+D))
170 F=SIN(R)*V
180 H=COS(R)*V
190 Z=Z+H
200 A=A+F
230 PLOT Z,A,1
240 N=N+1
250 IF Z<600 THEN GOTO 140
260 Y=Y+1
270 IF Y=3 THEN GOTO 300
280 PLOT 5,5,-2
290 GOTO 40
300 END

```

statement number 160 เปลี่ยนจาก  $R = (R+C+D)$   
เป็น  $R = (R+C+D)/(1+P*ABS(C+D))$

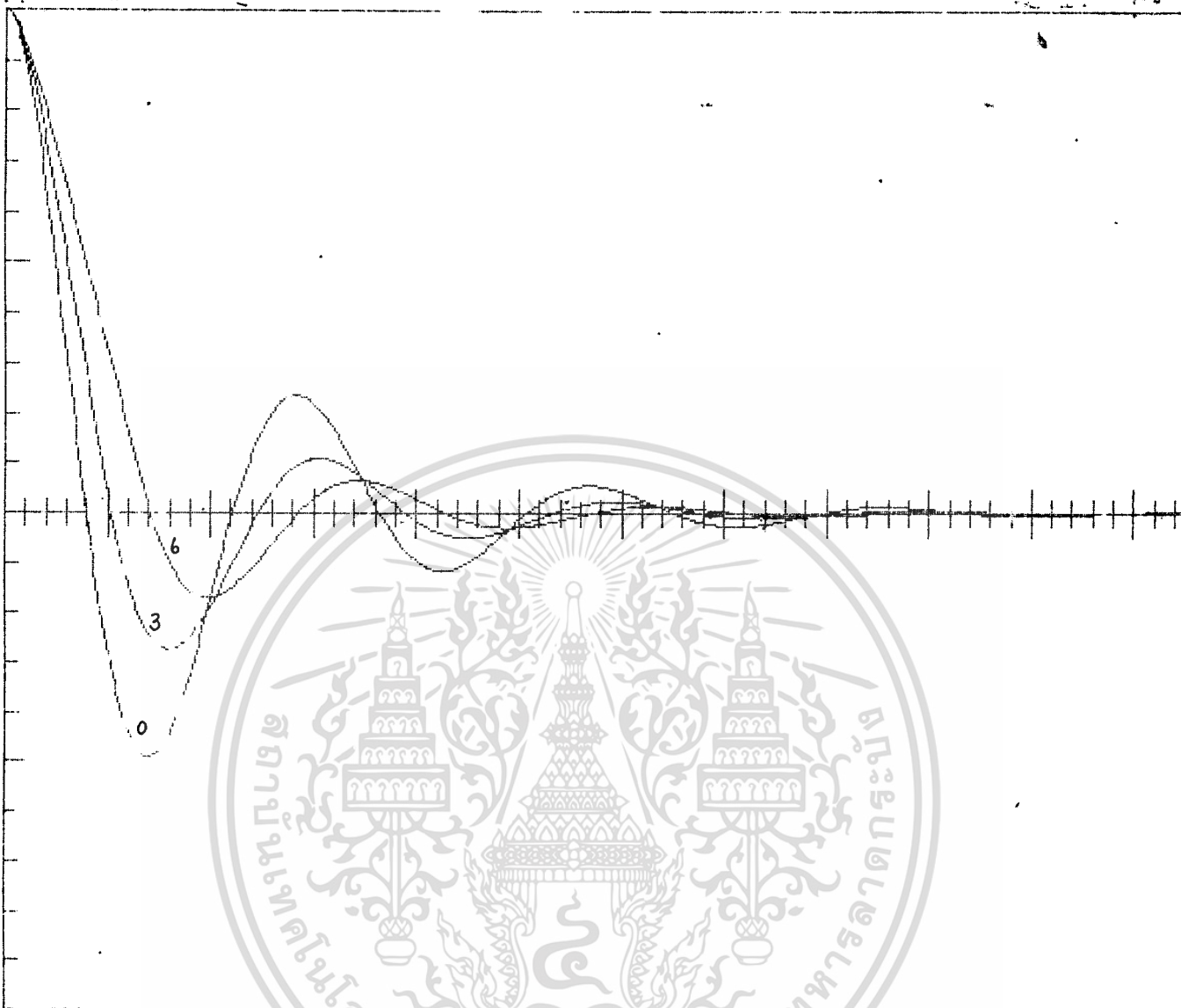
ภาพที่-26 แสดง โปรแกรม ที่เพิ่ม เทอมหนองเหนียวต่อคำสั่ง เข้าไปแล้ว



ภาพที่-27

แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้

- V = 100 เมตร ต่อ วินาที
- T =  $\Delta t$  = 0.01 วินาที
- K = k = 0.5
- B =  $\beta$  = -0.05
- A = E = 10 เมตร
- P = คาบวงเหี่ยว = 0, 3, 6 ตามลำดับ
- ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร

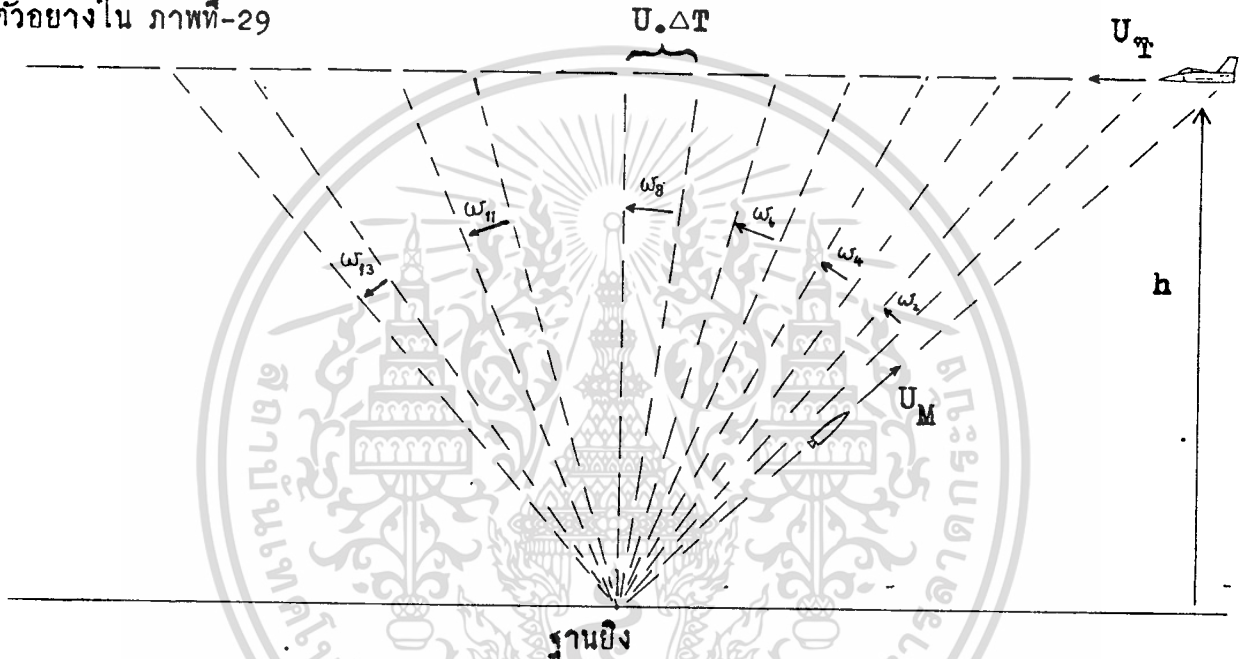


ภาพที่-28 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้  
 $V = 100$  เมตร ต่อ วินาที  
 $T = \Delta t = 0.01$  วินาที  
 $K = k = -0.2$   
 $B = \beta = -0.02$   
 $A = E = 10$  เมตร  
 $P =$  ค่าคงตัวทวนวงเหินยาว  $= 0, 3, 6$  ตามลำดับ  
 ระยะทางตลอดแนวนอน  $600$  เมตร

## 6.2 ความเร็ว เป้าหมาย

ถึงแม้ว่าความเร็วของเป้าหมายอาจไม่มีผลมากนักสำหรับ ระบบจรวดนำวิถีต่อสู้รถถัง แต่ก็ได้ศึกษาผลของความเร็ว เป้าหมายด้วยโดยสมมุติให้เป้าหมายเป็นเครื่องบิน

ในทางปฏิบัติ ผลจากความเร็วมุมของเป้าหมายอาจเกิดขึ้นได้ในหลายลักษณะ ขึ้นกับ แนวทางการบินของเป้าหมาย จึงไม่สามารถหา พังก์ชัน ที่แน่นอนแทนค่าในสมการได้ ดังแสดง ตัวอย่างใน ภาพที่-29



ภาพที่-29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเป้าหมาย กับ ความเร็ว เชิงมุมที่ฐานยิง

โดยการสมมุติให้เป้าหมายบินสูงจากพื้นดิน  $h$  ด้วยความเร็วคงที่  $U_T$  ในทุกๆ time increment  $\Delta T$  เป้าหมายจะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าๆกัน ซึ่งทำให้ความเร็วเชิงมุมที่ฐานยิงจรวด ( $\omega_1 \sim \omega_{13}$ ) เป็นไปดังนี้

$$\omega_3 < \omega_4 < \omega_5 < \omega_6 < \omega_7 < \omega_8 = \omega_9 > \omega_{10} > \omega_{11} > \omega_{12} > \omega_{13}$$

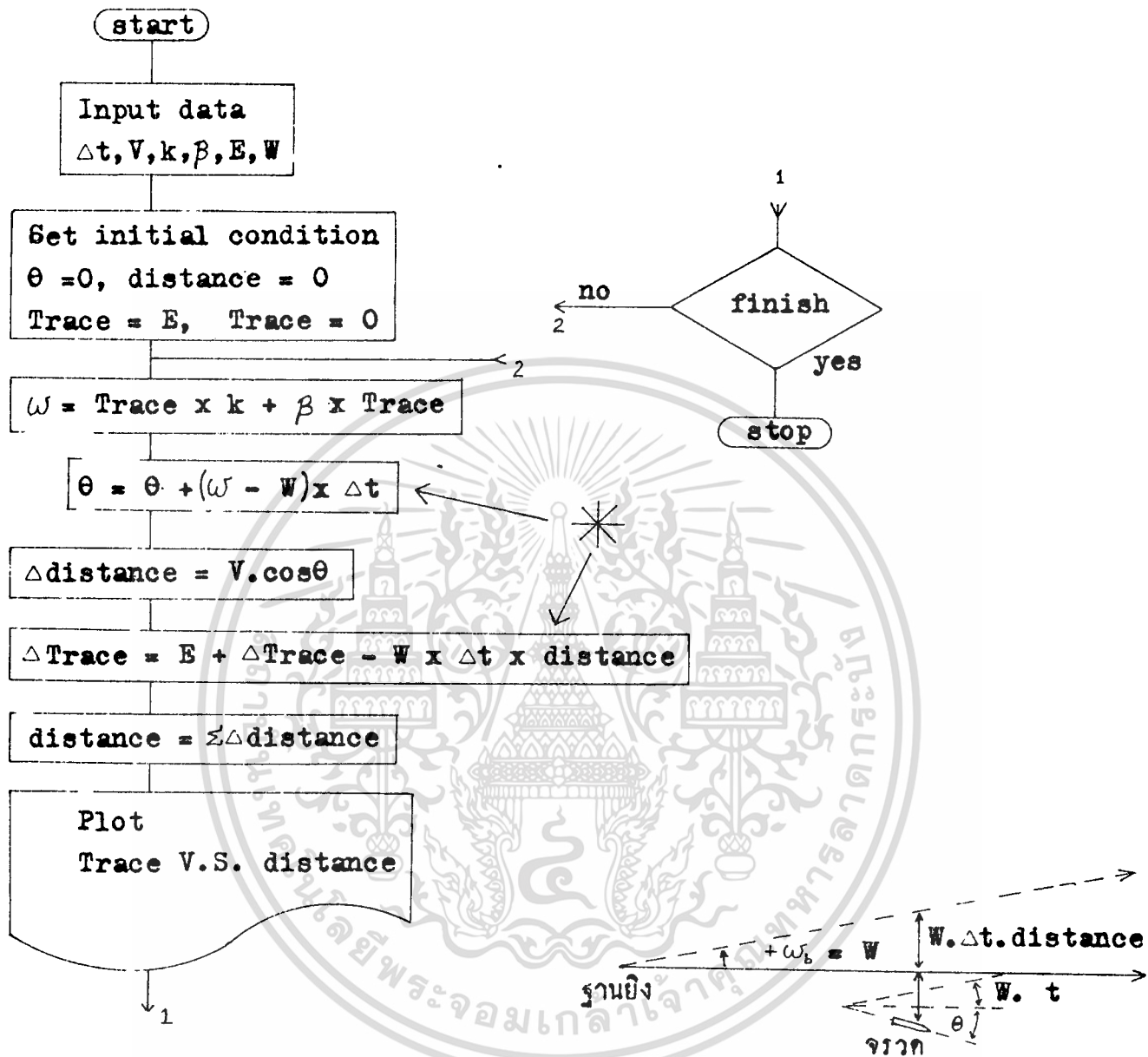
กล่าวโดยย่อคือ  $\omega$  มีค่าไม่คงที่และไม่ลิเนียร์ แต่จะมีค่าสูงสุดเมื่อเป้าหมายบินผ่านฐานยิงจรวด เพื่อให้การคำนวณทำได้สะดวกจึงได้เลือก พังก์ชัน ของความเร็วเชิงมุมไว้เป็นสองลักษณะคือ

- 6.2.1  $\omega$  มีค่าคงที่  
 6.2.2  $\omega$  เพิ่มขึ้นอย่าง ลินีียร์

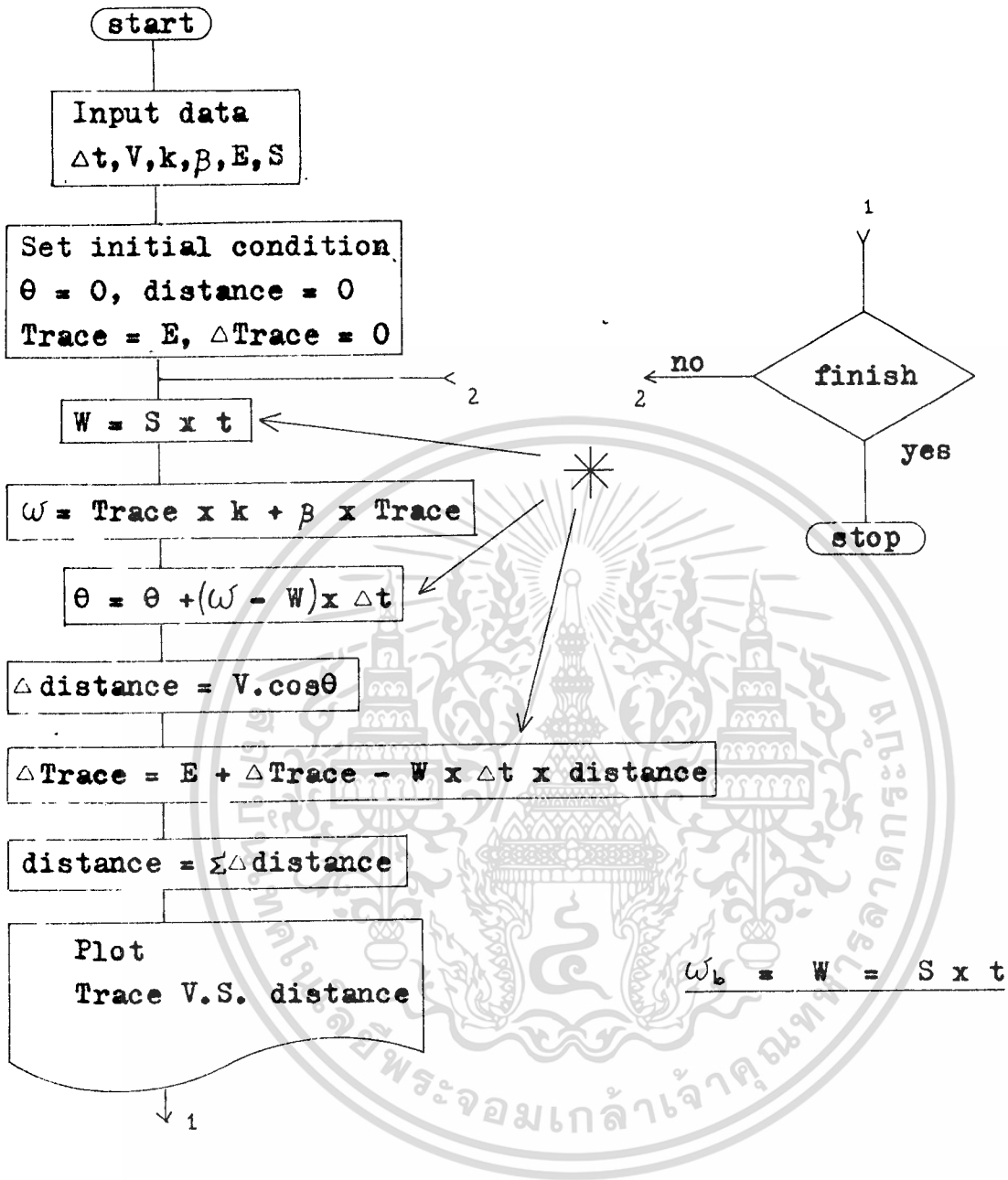
Program , Flow chart และผลการคำนวณแสดงไว้ใน ภาพที่-30 ถึง ภาพที่-34 ตามลำดับ

จาก ภาพที่-33 ผลของความเร็วเชิงมุมที่ฐานยิงซึ่งมีค่าคงที่ จะทำให้ระยะกลศาสตร์เคลื่อนจากแนวสายตาแปร โดยตรงกับค่าความเร็วเชิงมุม ส่วนใน ภาพที่-34 แสดงให้เห็นว่าผลจากความเร็วเชิงมุมที่ฐานยิงซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างลีนีียร์จะทำให้ระยะกลศาสตร์เคลื่อนจากแนวสายตาเพิ่มขึ้นตามระยะทาง





ภาพที่-30 แสดง Flow chart สำหรับค่าความเร็วเชิงมุมที่ฐานยิงเป็นค่าคงที่



ภาพที่-31 แสดง Flow chart สำหรับค่าความเร็วเชิงมุมที่ฐานยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างลิเนียร์

```

10  PLOTTER IS 13,"GRAPHICS"
15  GRAPHICS
20  SCALE 0,600,-10;10
25  AXES 10,1,0,0,5,5,5
30  FRAME
40  INPUT V,T,A,K,B,W
50  S=0
70  F=0
80  P=0
90  Z=0
100 V=V*T
110 F=K*T
140 C=A*K
150 D=F*B
160 R=R+C+D-W*T
170 F=SIN(R)*V-W*Z*T
180 H=COS(R)*V
190 Z=Z+H
200 A=A+F
210 PLOT Z,A,1
220 N=N+1
230 PLOT Z,A,1
240 N=N+1
250 IF Z<600 THEN GOTO 140
260 Y=Y+1
270 IF Y=3 THEN GOTO 300
280 PLOT 5,5,-2
290 GOTO 40
300 END

```

ω มีค่าคงที่

สำหรับ ω เปลี่ยนแปลงอย่าง สีนัยร์ กับเวลา ก็แปลงโปรแกรมดังนี้

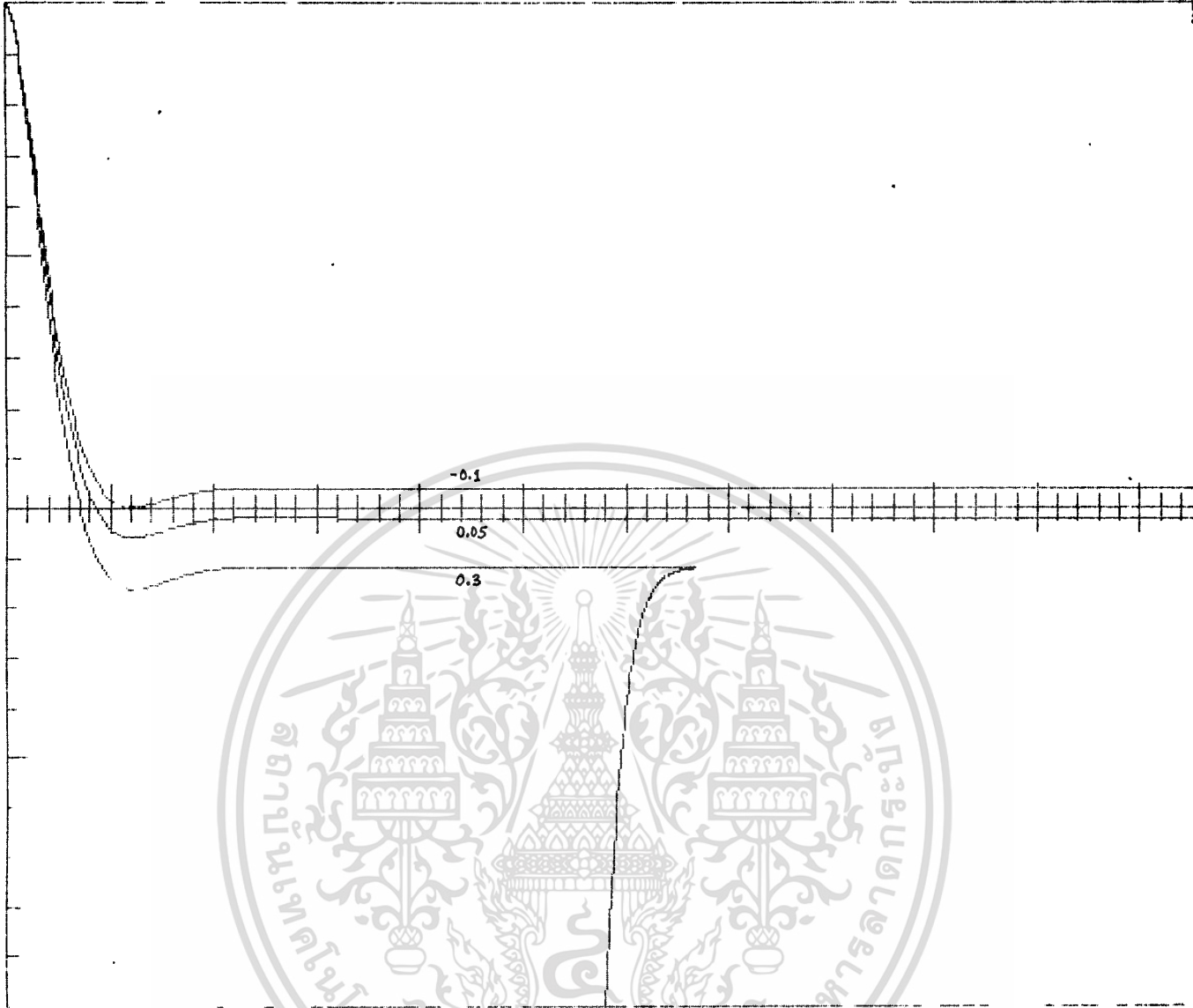
```

40  INPUT V,T,A,K,B,S
...
95  N = 0
...
155 W = N x T x S
...
240 N = N + 1

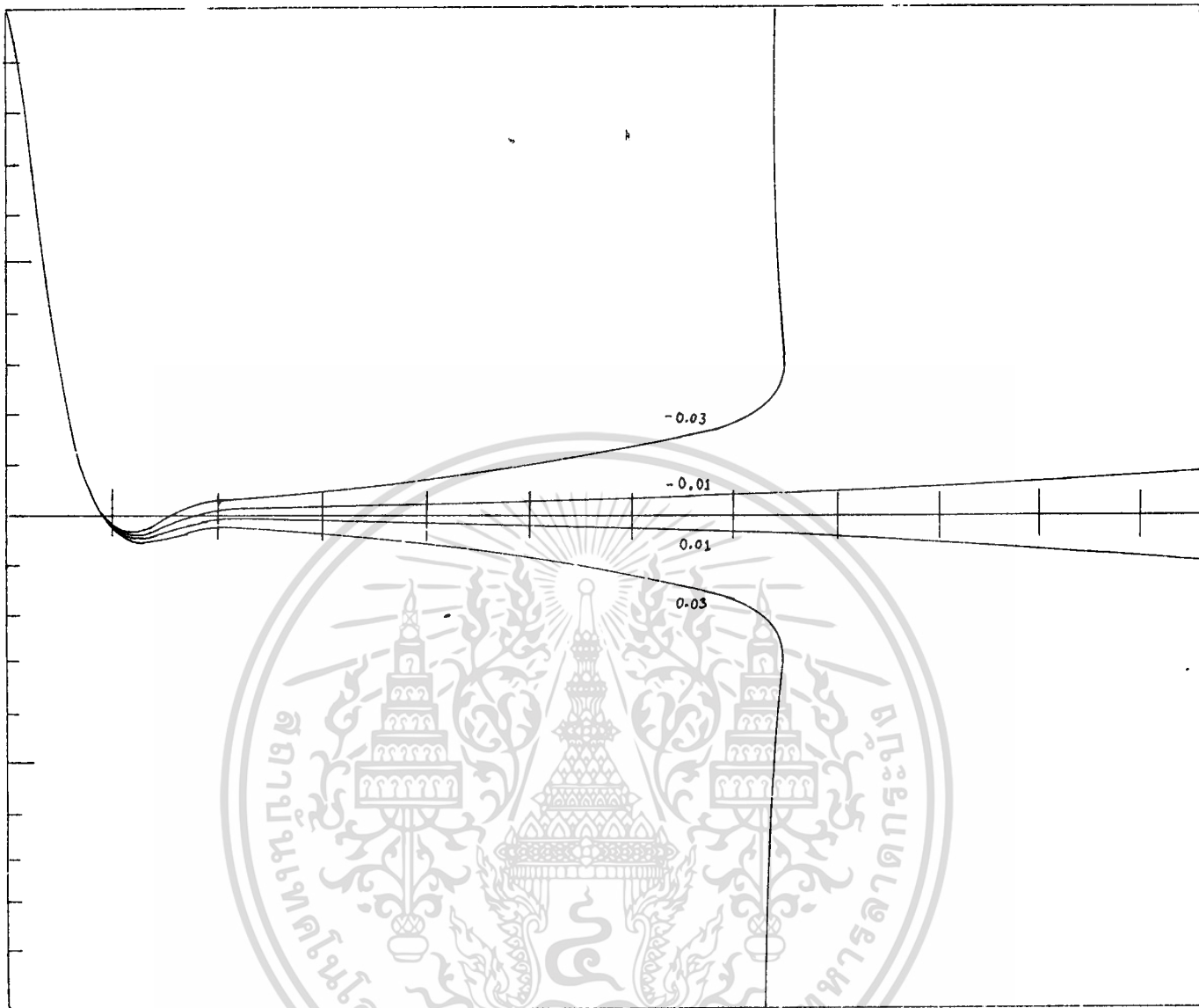
```

ภาพที่-32 แสดง โปรแกรมคำนวณสำหรับความเร็วเชิงมุมที่ฐานยังไม่เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่-33 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ พารามิเตอร์ ดังนี้  
 $V = 100$  เมตร ต่อ วินาที  
 $T = t = 0.01$  วินาที  
 $K = k = -0.5$   
 $B = \beta = -0.1$   
 $A = R = 10$  เมตร  
 $W = -0.1, 0.05, 0.3$  ตามลำดับ  
 ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร



ภาพที่-34

แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ พหุนามเทย์เลอร์ ดังนี้

$$V = 100 \text{ เมตร กอ วินาที}$$

$$T = t = 0.01 \text{ วินาที}$$

$$K = k = -0.5$$

$$B = \beta = -0.1$$

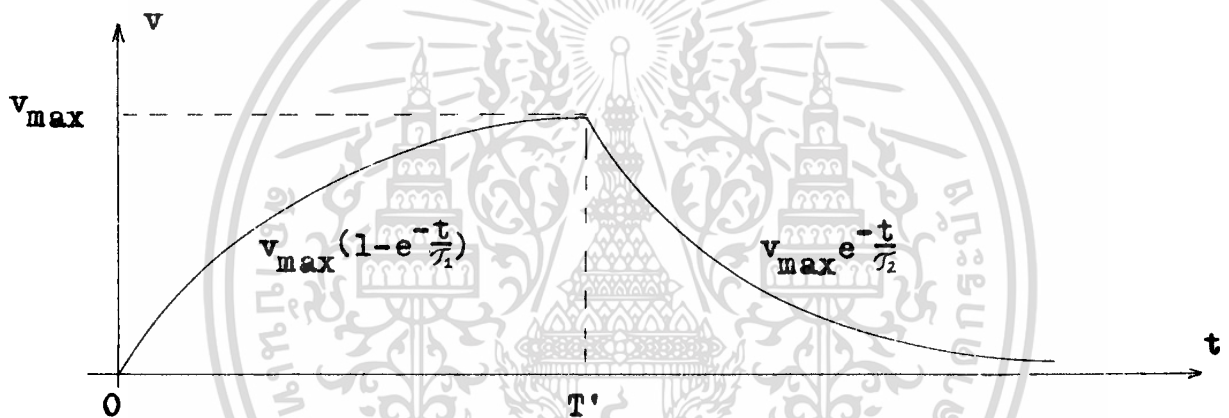
$$A = E = 10 \text{ เมตร}$$

$$S = 0.01, -0.01, 0.03, -0.03 \text{ ตามลำดับ}$$

ระยะทางตลอดแนวนอน 600 เมตร

### 6.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของจรวด

ความเร็วของจรวดจะแปรกับระยะทางหรือเวลา ด้วยค่าต่างๆกันขึ้นอยู่กับชนิดของจรวด สำหรับในโครงการ นี้ยังไม่มีโอกาสที่จะศึกษา profile ความเร็วของจรวดจริง ทั้งนี้ เนื่องจากทำได้ยากและต้องใช้เงินทุนสูง จึงได้สมมุติ velocity profile ขึ้นเพื่ออานำไปแทรกในโปรแกรมโดยนำไป process กับความเร็วคงที่  $V$  ก่อนที่จะนำค่าความเร็วไปใช้ในส่วนอื่นๆของโปรแกรมต่อไป ทั้งแสดง profile ไว้ใน ภาพที่-35



ภาพที่-35 แสดง velocity profile ที่ได้สมมุติขึ้นสำหรับจรวด ขับด้วยเชื้อเพลิงแข็ง

จาก ภาพที่-35 ช่วงเวลาจาก  $0 \rightarrow T'$  เป็นช่วงที่คินซิมจรวดยังทำงานอยู่ความเร็ว จึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆด้วยสาเหตุสองประการคือ

6.3.1 กฎของนิวตัน  $F = m \cdot a$

6.3.2 แรงขับจรวดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพื้นที่เผาไหม้ของ เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเชื้อเพลิงลดลง

จึงสมมุติให้ profile ในช่วงเวลา  $0 \rightarrow T'$  เป็น

$$v_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$$

$T_1$  : ค่าคงตัวการเพิ่มความเร็ว

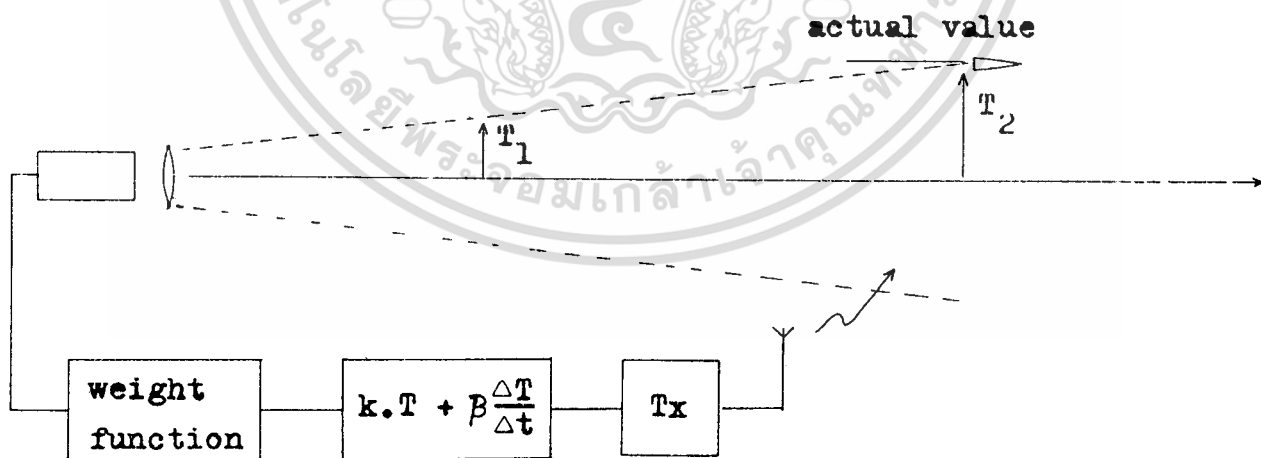
เมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดกลางแรงขับเคลื่อนก็จะหมดไป เหลือไว้แค่แรงฉุดของอากาศ ซึ่งแปรตามความเร็วจรวด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าแปรผกผันกับความเร็วที่ลดลงของจรวด จึงสมมติให้ profile เป็น

$$v_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad T_2 : \text{ค่าคงตัวการลดความเร็ว}$$

นำ profile ทั้งสองช่วงนี้เพิ่มเข้าไปในโปรแกรม ก็จะสามารถคำนวณหาวิถีจรวด เมื่อความเร็วของจรวดไม่คงที่ได้

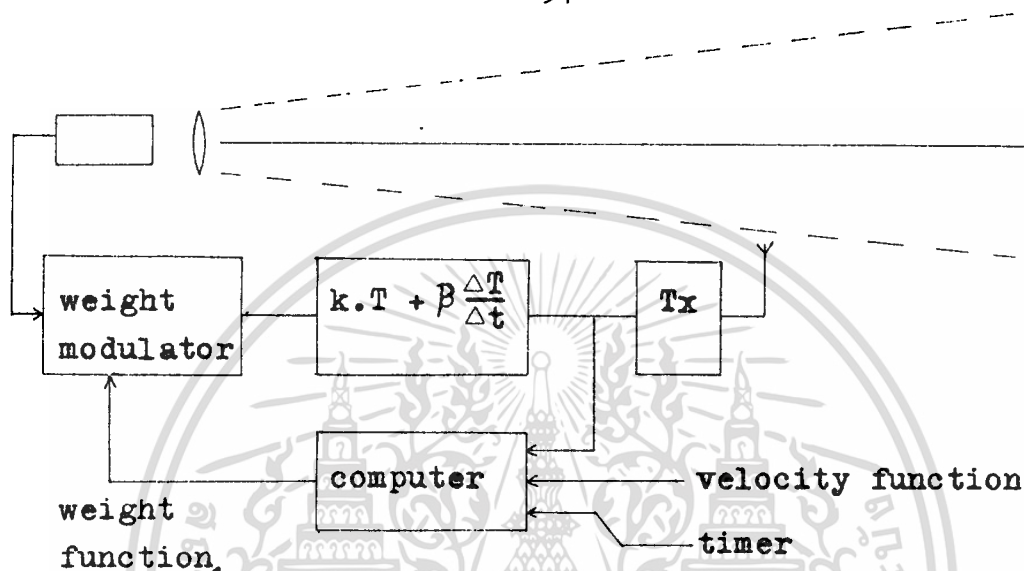
#### 6.4 ระยะทางที่เปลี่ยนไป

เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นไม่ทำให้ พารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปแต่อย่างใด แต่ Trace data ที่วัดได้จากกล้องติดตามซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีมุมกระจายออก (diverge angle) มีค่าลดลงจากความเป็นจริง ดังนั้นเมื่อทราบมุมกระจายออกของกล้องติดตาม ที่ใข้อยู่ก็จะสามารถหา แพคเตอร์ มาชดเชย Trace data ที่วัดได้ให้ถูกต้องได้ดัง แสดงไว้ใน ภาพที่-36



ภาพที่-36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมกระจายออกของกล้องติดตาม กับ Trace data ที่วัดได้

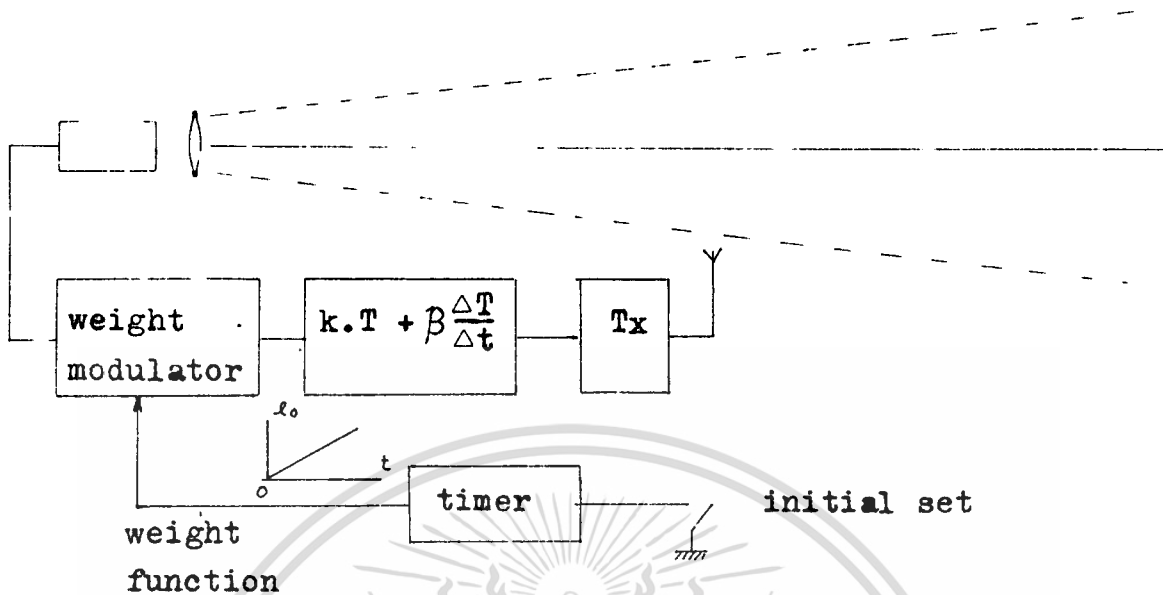
ค่า แพลกเตอร์ชกเซย จะแปรอย่างลิเนียร์กับระยะทาง ซึ่งค่าระยะทางจะหาได้ โดยใช้ระบบ อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงใน ภาพที่-37



ภาพที่-37

แสดงการชกเซยผลจากมุมกระจายของกล้องติดตาม

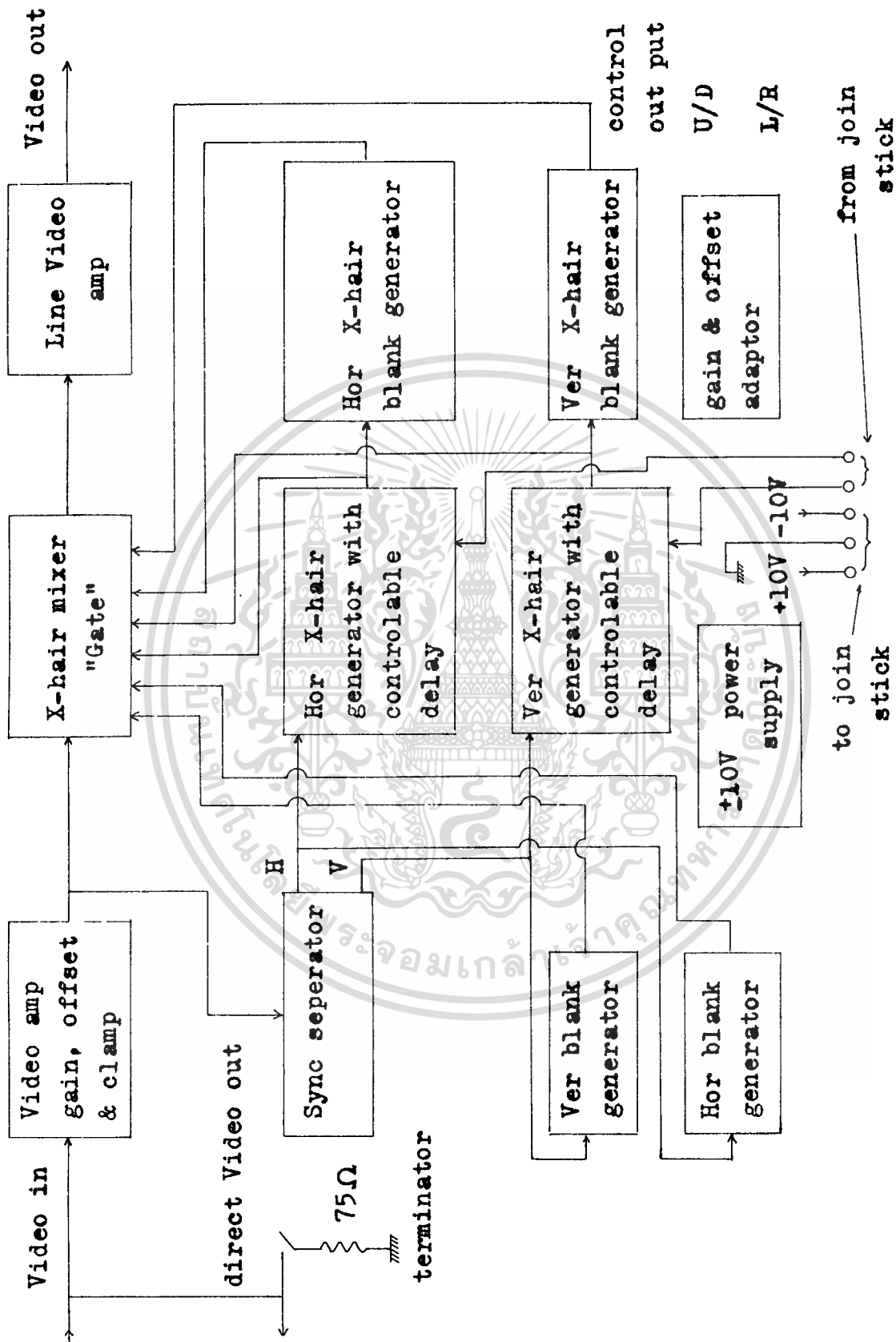
ภาพที่-37 แสดงถึงความเป็นไปได้ของระบบ แต่คงใช้อุปกรณ์มากมาย ดังนั้นเพื่อให้ได้ระบบนำวิถีที่มีราคาต่ำจึงได้สมมุติให้ ระยะทางแปร โดยตรงกับ เวลาที่ ได้สมมุติไว้ใน บทที่ 4 ทำให้สามารถลดระบบลงได้ดังแสดงใน ภาพที่-38



ภาพที่-38 แสดงการชดเชยผลจากมุมกระจายออกของกลองตึกตามแบบง่ายๆ

ในทางปฏิบัติถ้าใช้กลองตึกตามกำลังขยายสูงแล้ว มุมกระจายจะมีค่าน้อยลง และเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลที่มีต่อวิถีรวมเมื่อค่า  $k, \beta$  ลดลงซึ่งเพียงทำให้ความถี่และขนาดของวิถีวอกวน (overshoot) เปลี่ยนไปบ้าง จึงอาจกล่าวได้ว่าการชดเชยผลจากมุมกระจายออกของกลองตึกตามสำหรับระบบนำวิถีราคาประหยัดนี้ไม่มีความจำเป็น อีกทั้งผลที่เกิดจากมุมกระจายของกลองตึกตามโดยไม่มีการชดเชยนี้ยังเป็น fine trimming ของการควบคุมอีกด้วย กล่าวคือจะทำให้การควบคุมเป็นไปอย่างนิ่มนวลเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ค่า  $k, \beta$  ที่ลดลงจะต้องยังคงยังสามารถเอาชนะความคลาดเคลื่อนต่างๆที่เกิดจากระบบกลไกได้





ภาพที่-40 แสดงแผนผังการทำงานของหน่วยสร้างศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

7.2 หน้าทีของหน่วยต่างๆ

**Video amp** หน่วยแรกจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดเหมาะสม และ clamp สัญญาณรวมทั้งปรับ offset เพื่อให้ได้สัญญาณ video ที่มีทั้งขนาดและ offset ที่เหมาะสม

**Sync separator** จะทำหน้าที่แยก vertical sync และ horizontal sync ออกจากกันเพื่อใช้เป็น timing reference ต่อไป

**Vertical & Horizontal blank** จะสร้างสัญญาณ blank ขึ้นเพื่อนำไปใช้ป้องกันส่วนเกินของ modulation ที่ X-hair mixer "Gate" หนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ภาพม

**Vertical & Horizontal X-hair** สร้าง X - hair ที่สามารถควบคุมเวลาหน่วงเหนี่ยวได้ สำหรับ modulate เข้ากับสัญญาณ video เป็น marker

**Vertical & Horizontal X-hair blank** สร้าง blank pulse เพื่อลบเส้น X-hair ที่จุดตัดกันของ X-hair ในจอภาพ ช่วยให้การใช้ศูนย์ติดตามทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

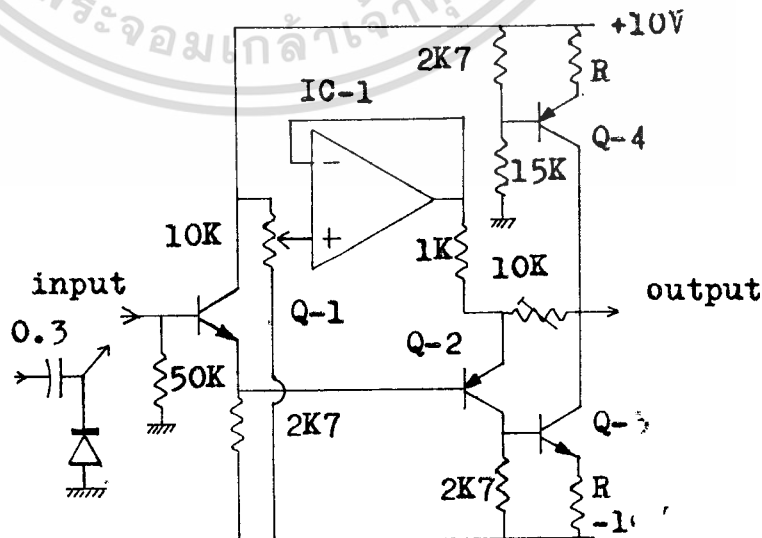
**Video line amplifier** เป็นหน่วยขยายกำลังของสัญญาณ video เพื่อขับออกสาย cable ไปยัง monitor

**Gain & offset adaptor** ใช้แปลงสัญญาณควบคุมให้ match กับจุดสัญญาณเข้าของหน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์

**±10V power supply** สร้างไฟ DC คงที่จ่ายให้กับวงจรทั้งหมด

7.3 รายละเอียดวงจรแต่ละหน่วยจะได้แยกอธิบายการทำงานดังต่อไปนี้

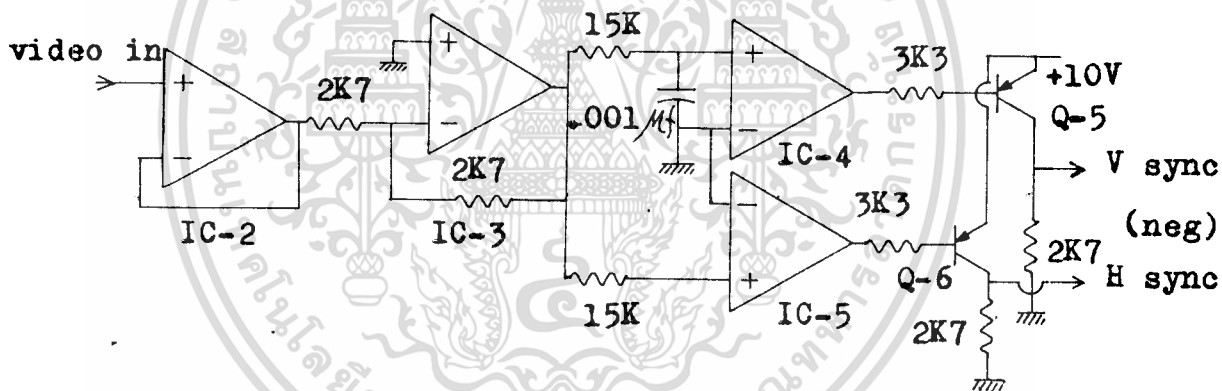
7.3.1 Video amplifier ( Input & Line amplifier )



ภาพที่-41 แสดงวงจร Video amplifier

- Q-1 เป็น input buffer โดยใช้วงจร emitter follower
- Q-2 เป็นวงจรขยายสัญญาณและรับ negative feedback เข้าที่ขา emitter โดยปรับค่าส่งขยายได้จาก VR-10K
- IC-1 เป็น DC buffer เพื่อสร้างระดับอ้างอิงให้กับ Q-2 หรือเป็น offset adj
- Q-3 เป็น output amplifier
- Q-4 เป็น active load ของ Q-3
- R: emitter resistance ของ output circuit
- R = 200 สำหรับ input video amplifier
- R = 27 สำหรับ video line amplifier

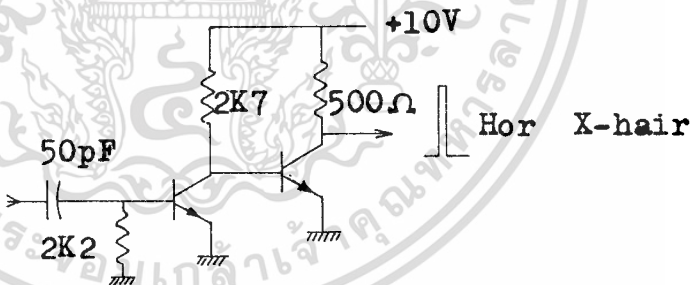
7.3.2 Sync seperator



ภาพที่-42 แสดงวงจรแยกสัญญาณ sync ( sync seperator )

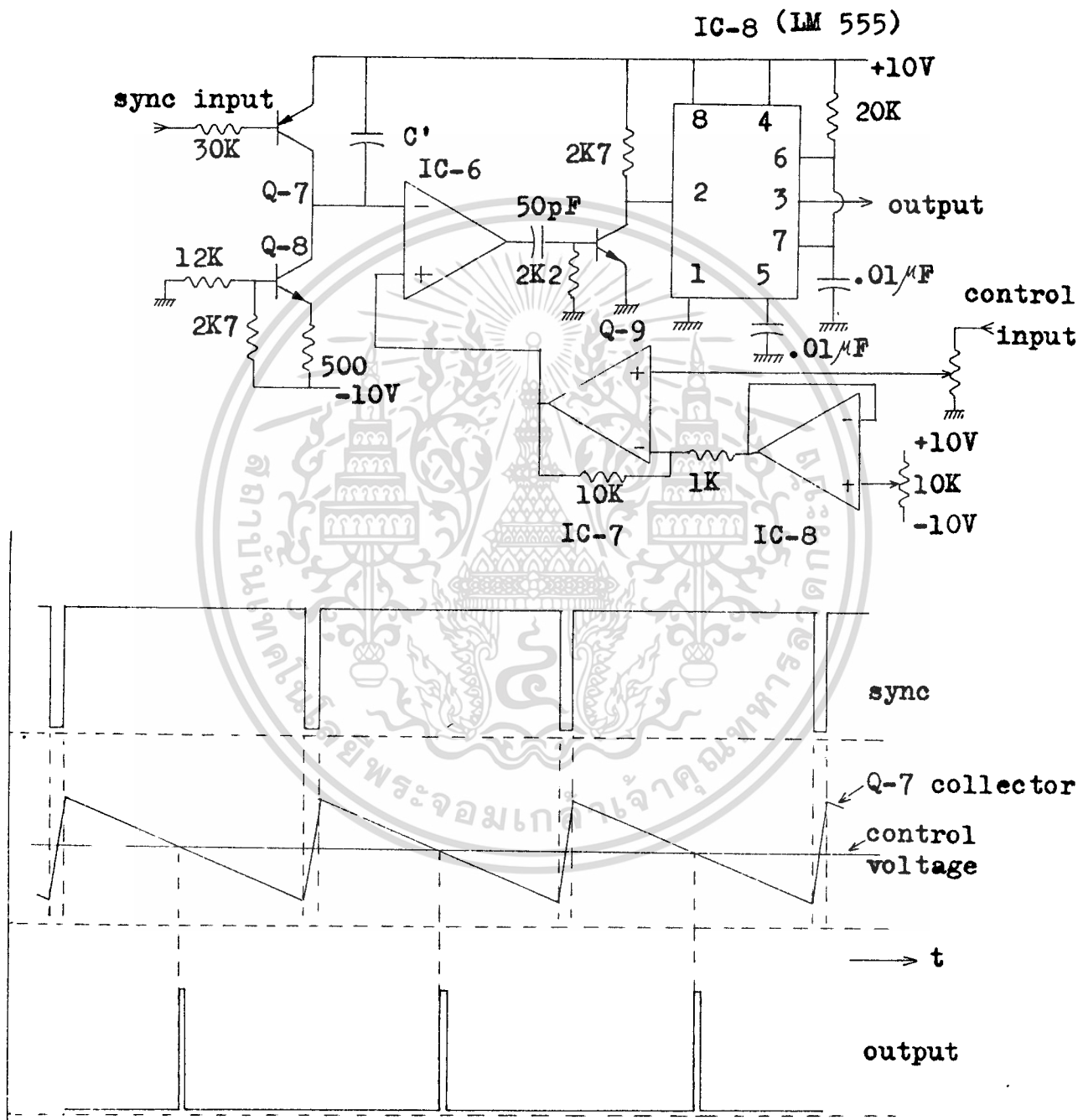
IC-2 เป็น buffer และ IC-3 เป็น inverter โดยป้อน negative video ที่มี negative offset เล็กน้อยเข้าที่ IC-2 จะทำให้ได้ positive video ที่มี positive offset ที่จุดสัญญาณเข้าของ comparator ( IC-4, IC-5 ) IC-4 จะใช้กับสัญญาณผ่าน low pass filter จึงมีแค่ vertical sync เข้า IC-4 ส่วน IC-5 รับสัญญาณ sync ทั้งหมด หรืออีกนัยหนึ่งคือสัญญาณ Hor sync Q-5, Q-6 เป็น vertical และ horizontal wave shapping ตามลำดับ สัญญาณที่ขา collector ของ Q-5, Q-6 จะเป็น negativesync

- Q-7 เป็น input switch ความคุมโดยสัญญาณ sync
- Q-8 เป็น current source ประจุ C' ซึ่ง Q-7 & Q-8 ความคุมโดยสัญญาณ sync จะสร้าง negative ramp ขึ้นมา
- IC-7, IC-8 เป็น gain และ offset ซึ่งจะแปลงสัญญาณควบคุมจากภายนอก (join stick) ให้สามารถใช้ได้กับวงจร
- IC-6 เป็น comparator เปรียบเทียบสัญญาณ ramp กับ control voltage เมื่อใดที่สัญญาณ ramp มีค่าต่ำกว่า control voltage สัญญาณออกของ IC-6 จะเป็นบวก ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิด sharp negative pulse ที่ขา collector ของ Q-9 และกระตุ้น LM-555 ที่ต่อไว้เป็น singleshot สร้าง X-hair pulse ออกมาโดยควบคุมความกว้างของ X-hair ได้จาก R-C
- สำหรับวงจร vertical X-hair ใช้ค่า  
 $R = 20K$  ,  $C = .01\mu F$   $C' = 0.1\mu F$
- ส่วนวงจร horizontal X-hair ใช้ค่า  $C' = 0.0082$   
 และเปลี่ยนวงจรจาก Q-9 และ LM-555 ใหม่เป็น

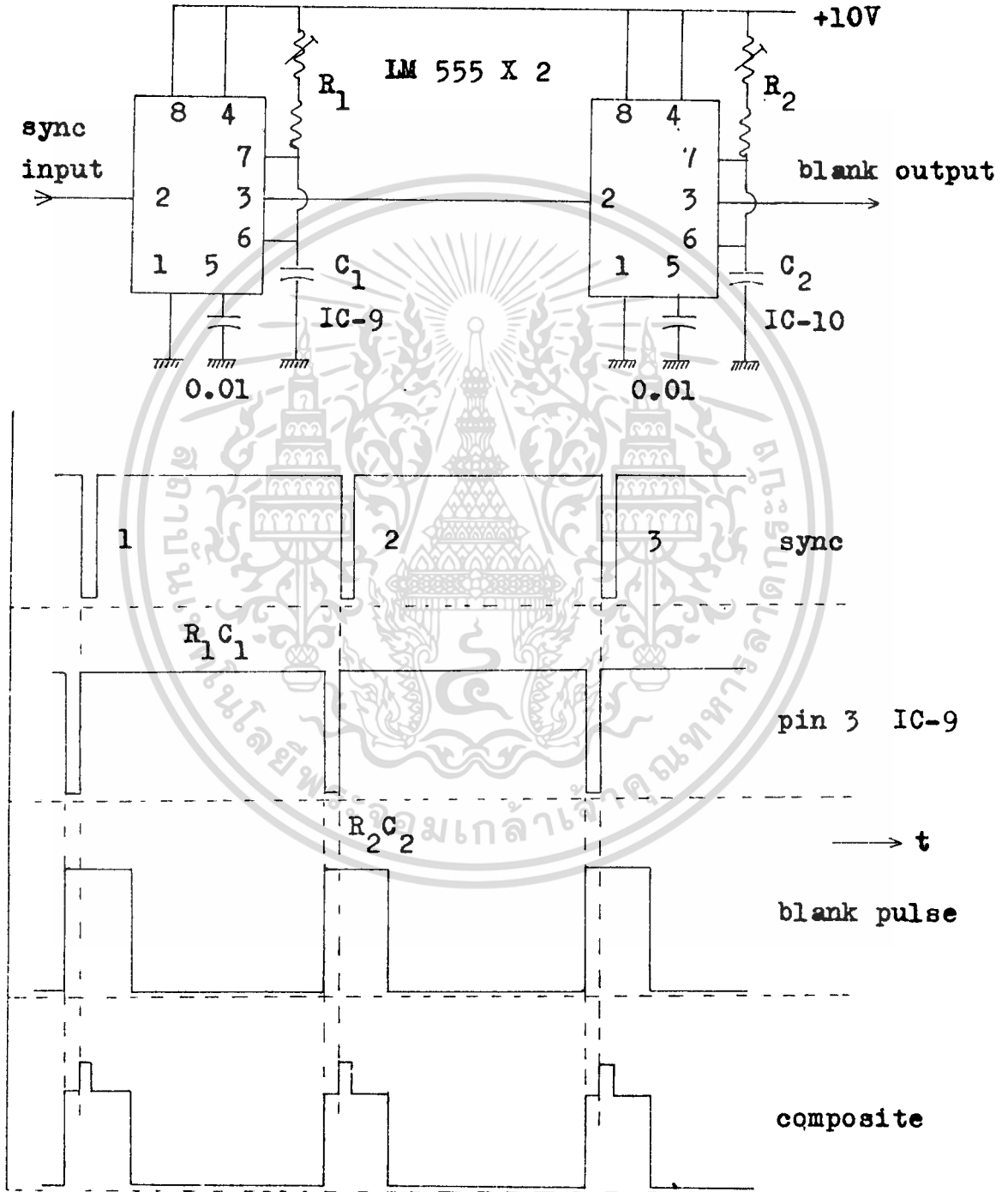


ภาพที่-44 แสดงวงจรแก้ไขสำหรับ horizontal X-hair

7.3.3 X-hair generator ความคุม delay time ได้



### 7.3.4 Blank generator



ภาพที่-45 แสดงวงจรสร้างสัญญาณ blank

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

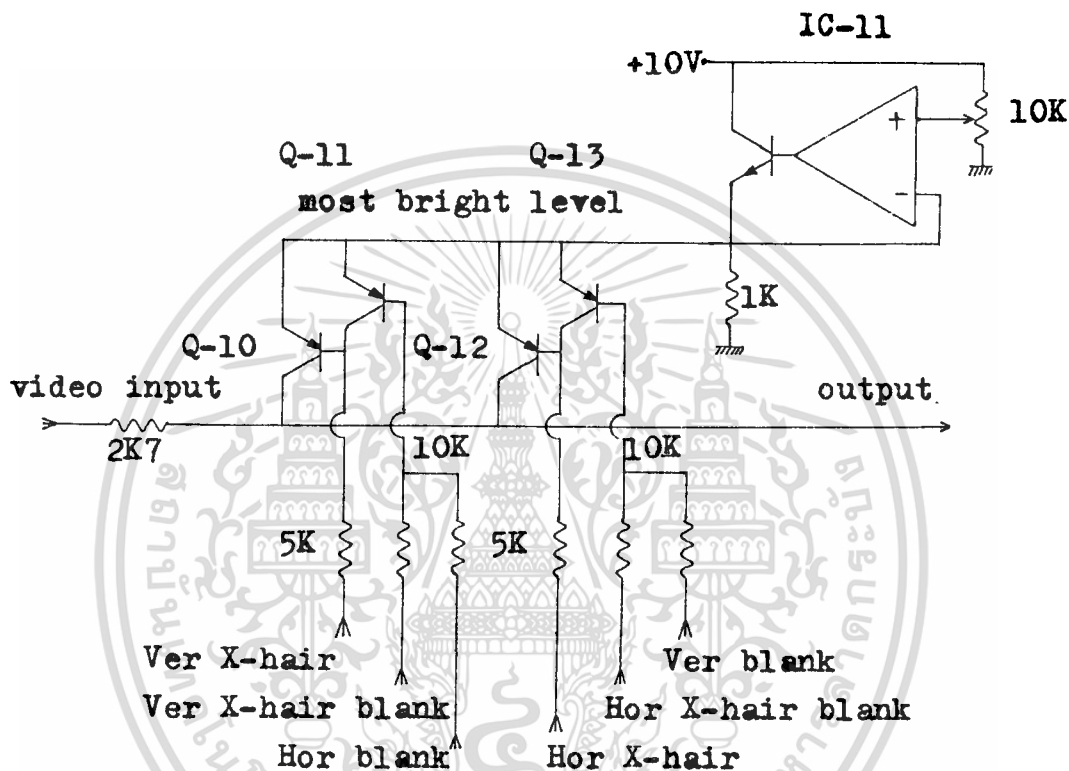
IC-9 จะใช้ leading edge ของ sync (1) กระตุ้นให้เกิด single shot pulse ซึ่งควบคุมโดย  $R_1C_1$  มี timing ยาวไปถึง leading edge ของ สัญญาณ blank เมื่อ IC-9 ครบเวลา output เปลี่ยนสัญญาณออกจาก บวก เป็นลบ ก็จะกระตุ้น IC-10 ให้เกิด single shot blank pulse ออกมาซึ่งควบคุม timing โดย  $R_2C_2$

ตารางแสดงค่า  $R_1, R_2$  และ  $C_1, C_2$  ของวงจร blank generator

	$R_1$		$R_2$		$C_1$	$C_2$
	R	VR	R	VR		
Vertical	56K	100K	50K	100K	0.15 $\mu f$	0.1 $\mu f$
Horizontal	5.6K	10K	5.0K	10K	0.005 $\mu f$	0.001 $\mu f$

### 7.3.5 X-hair mixing "Gate"

สัญญาณ X-hair, blank ต่างๆจะถูกนำมารวมเข้ากับสัญญาณ video ที่ส่วนนี้ โดยมีวงจรแสดงไว้ดังนี้

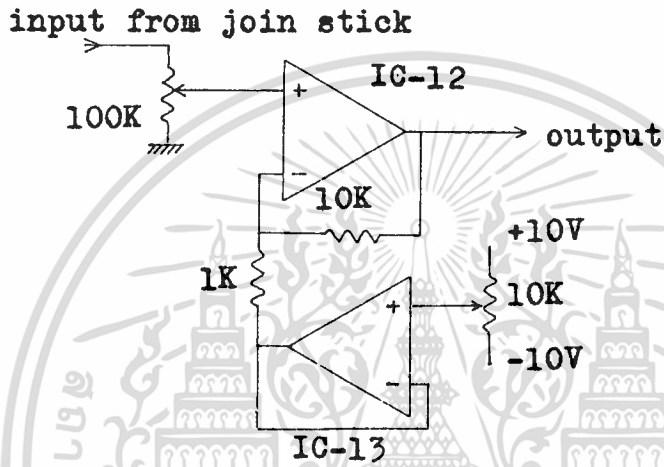


ภาพที่-46 แสดงวงจรรวมสัญญาณ X-hair เข้ากับสัญญาณ video

Q-10, Q-12 เป็น X-hair mixer ของ vertical และ horizontal ตามลำดับ IC-11 และ Q-14 จะจ่ายระดับสว่างสูงสุดเป็นระดับอ้างอิงให้กับ Q-10, 11, 12, 13 สัญญาณ X-hair จะถูกป้อนเข้าที่ขา base ของ Q-10, Q-12 เพื่อรวมกับสัญญาณ video ส่วนสัญญาณ X-hair blank ก็จะถูกป้อนเข้าที่ขา base ของ Q-11, Q-13 เพื่อจะป้องกันการรวมสัญญาณในช่วงเวลาของ X-hair blank สำหรับ horizontal blank pulse ป้อนเข้าที่ขา base ของ Q-11 vertical blank pulse ป้อนเข้าที่ขา base ของ Q-13 เพื่อป้องกันไม่ให้ X-hair ของ vertical และ horizontal รวมกันซึ่งจะทำให้ภาพล้นได้

### 7.3.6 Gain & offset adaptor

วงจรส่วนนี้ใช้ปรับค่า คณิตศาสตร์ความคุมที่ได้รับจากคันควบคุมให้สามารถนำไปใช้ได้กับหน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ใดๆ



ภาพที่-47

แสดงวงจรปรับสัญญาณควบคุม

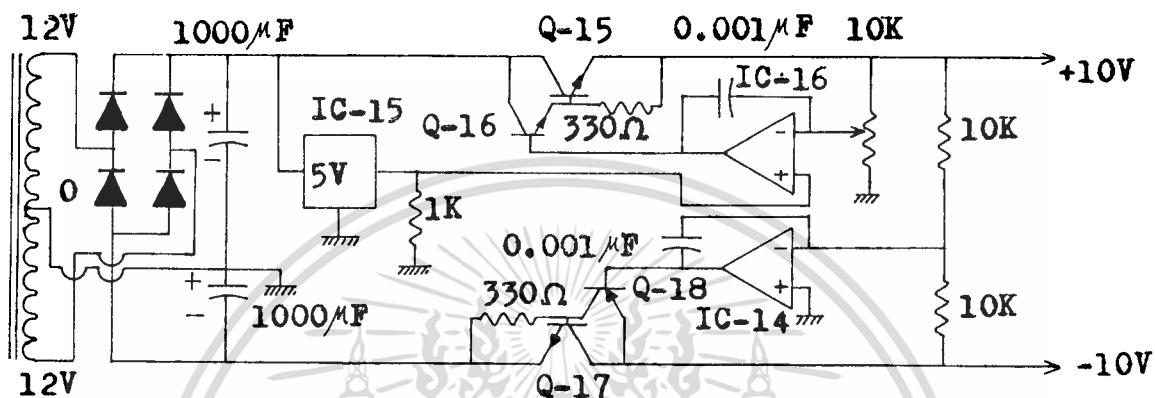
VR- 100 K ปรับกำลังขยาย

VR-10K ปรับ offset

IC-12 ขยายสัญญาณ

IC-13 buffer ให้กับระกบอ้างอิง

## 7.3.7 วงจรจ่ายไฟ +10V, -10V



ภาพที่-48 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟ +10V, -10V

ก้านขั้วมือของวงจรเป็น bridge dual potential rectifier ใช้  
C 1000  $\mu$  F สองตัวเป็นตัวกรองไฟ

IC-15 เป็นวงจรจ่าย ระบายความร้อน

IC-16, 14 เป็นส่วนขยายความคุมแรงดันไฟ

Q-15, 17 เป็นตัวจ่ายกำลังไฟ

Q-16, 18 เป็น darlington connection และเปลี่ยน mode  
การทำงานของ Q-15, 17 ให้เป็น NPN และ PNP

ความล่าช้า

VR-10K ใช้ปรับแรงดันไฟออกให้เป็น +10V

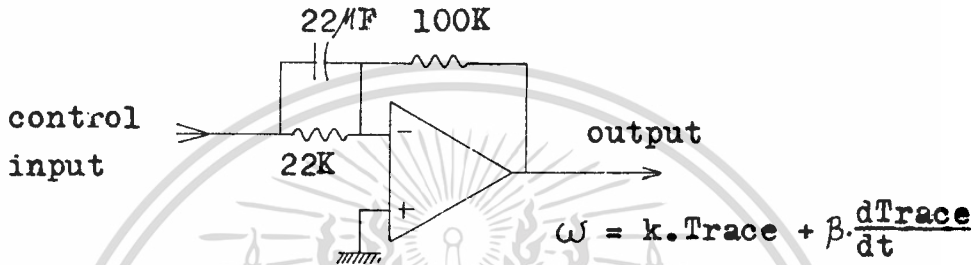
R-10K สองตัวต่อกันเป็นวงจรแบ่งไฟเพื่อสร้างไฟ -10V

โดยอาศัย IC-14 ซึ่งอ้างอิงอยู่กับระดั้มแรงดัน ศูนย์

บทที่ 8  
หน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์  
และการทดลองใน 1 มิตี

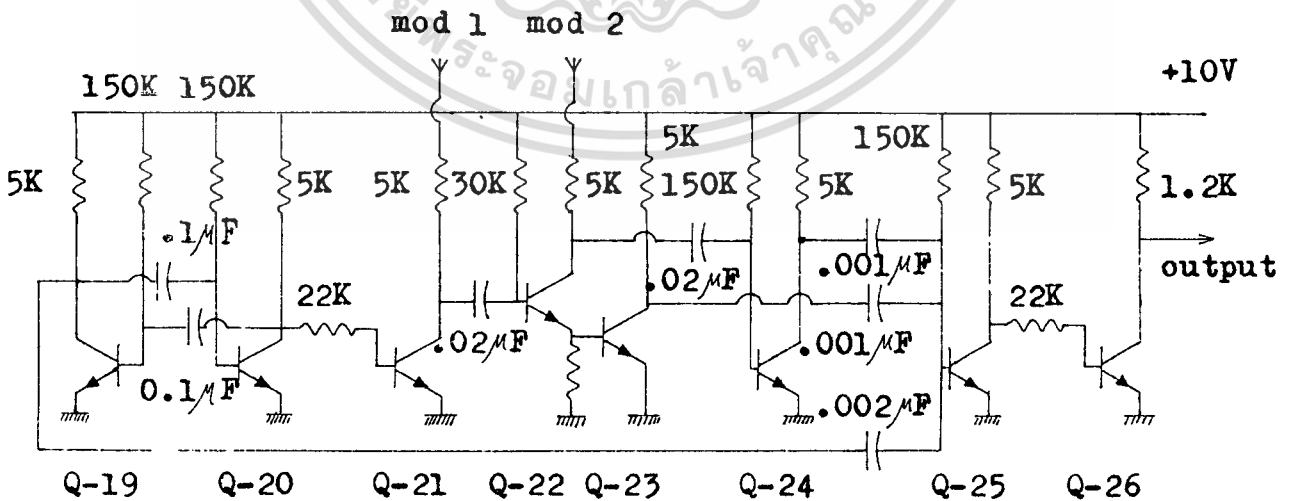
การทดลองได้ทำโดยใช้ระบบบังคับวิทยุ

8.1 โค้อาศัยสัญญาณออกจากหน่วยสร้างศูนย์คิกคามใน บทที่ 7 ซึ่งเป็นคังคักกล่าวถึงแล้วใน บทที่ 3 มาป้อนให้กับหน่วยควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ คังแสดงวงจรใน ภาพที่-49 (แสดงวงจรของมิตีเดียว)



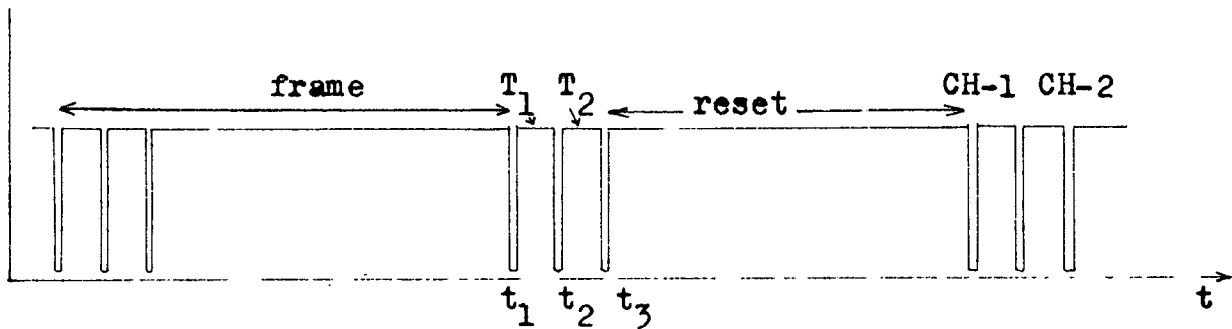
ภาพที่-49 แสดงวงจรกำหนดค่า แพคเตอร์ k และ β

จะเห็นได้ว่าวงจรใน ภาพที่-49 จะให้ผลคอมสมองค้อสัญญาณเข้าคักทั้งในค่านก่าลงขยายคงคัว และก่าลงขยาย คัพเพอเรนเซี่ยลในเวลาเคียวกัน จึงให้การทำงานตามสมการ 5.1 คักส่วนใน ภาพที่-50 แสดงวงจรแปลงสัญญาณ (ω) เป็นระบบ pulse digital proportional



ภาพที่-50 แสดงวงจรสร้างสัญญาณ Pulse digital proportional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **control system** เท่านั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



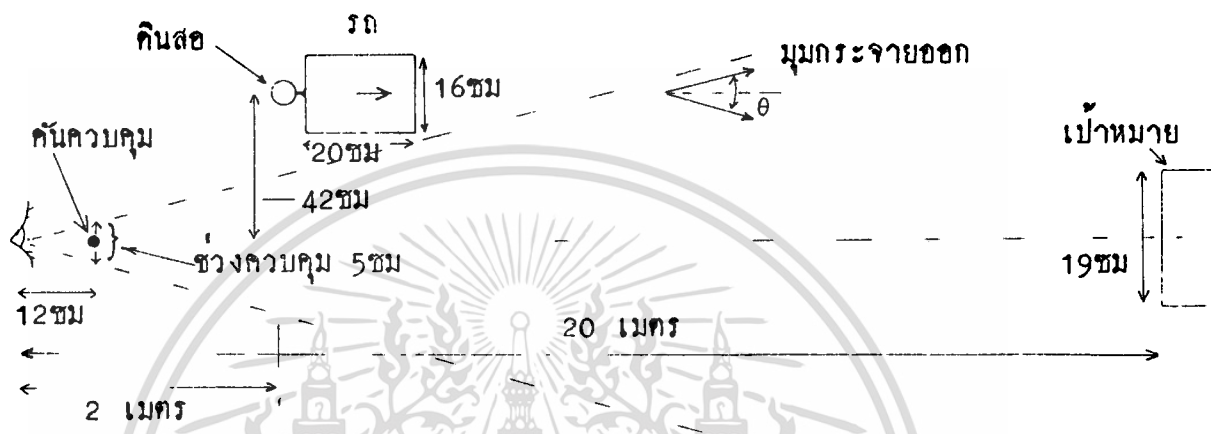
ภาพที่-51 แสดงสัญญาณ Pulse digital proportional

สัญญาณออกจาก Q-26 จะเป็นดังแสดงใน ภาพที่-51 เมื่อหมดช่วง reset จะเริ่มต้น CH-1 จากนั้นคือควาย CH-2 ค่าสั่งการควบคุมคือค่าของ  $T_1, T_2$  โดยตรง  $T_1, T_2$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1000MS 2000MS จุดกึ่งกลางคือ 1500MS หลักการทำงานของวงจร

Q-19, Q-20 เป็น multivibrator ให้ frame timing Q-21 เป็น inverter เพื่อกระตุ้น Q-22 ให้สร้าง pulse ของ CH-1 โดยควบคุม  $T_1$  ได้จากศักดาที่ป้อนให้กับ Q-21 เมื่อการทำงานของ Q-22 สิ้นสุดลงก็จะกระตุ้น Q-24 ให้สร้าง pulse ของ CH-2 ซึ่งควบคุม  $T_2$  จากศักดาที่ป้อนให้กับ Q-22 Q-23 เป็น inverter สำหรับสัญญาณ CH-1 จากนั้นสัญญาณ frame, CH-1, CH-2 จะมารวมกันกระตุ้น Q-25 ให้เกิด  $t_1, t_2, t_3$  ตามลำดับ สัญญาณใน ภาพที่-51 นี้ใช้ modulate กับเครื่องส่งออกอากาศไป

8.2 ภาคการทดลอง

การทดลองไม้จิ้มฟันที่แสดงรายละเอียดใน ภาพที่-52



ภาพที่-52 แสดงแผนผังของการทดลองกับรถยนต์บังคับวิทยุ

พารามิเตอร์ ต่างๆแสดงการหาค่าไว้ดังนี้

8.2.1 มุมกระจายออก จาก ภาพ-52 คันควบคุมห่างจากตา 12 ซม และช่องควบคุม กว้าง 5 ซม จะได้ค่ามุมกระจายออกดังนี้

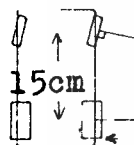
$$\text{มุมกระจายออก} = 20 = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{2.5}{12} \approx 23^\circ$$

8.2.2 ความเร็ว วัดความเร็วรถที่ใช้ทดลองได้

$$V = 14 \text{ m/10 seconds}$$

$$\therefore V = 1.4 \text{ m/s}$$

- 8.2.3 ความเร็วเชิงมุม จากการปรับระบบควบคุม เมื่อเบี่ยงเบนคันควบคุมไป  $\pm 2.5$  ซม ล้อหน้าของรถจะเบี่ยงเบนไปเป็นมุม  $\mp 10$  องศา ช่วงจากล้อหน้าถึงล้อหลัง ยาว 15 ซม จะหาค่ารัศมีวงเลี้ยวค่าสุดได้ดังนี้



$$R = \frac{15 \text{ cm}}{\tan \theta}$$

$$R = 85.069 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{1.4 \text{ m/s}}{0.85 \text{ m}} = \mp 1.647 \text{ radian/second}$$

- 8.2.4 ค่าคงตัวควบคุม ( $k$ ) เนื่องจากผลของค่า  $k$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง ขึ้นกับค่าของมุมกระจายออกตั้งใดกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.4 จึงได้สมมุติให้ค่ามุมกระจายออกเป็นศูนย์สำหรับการหาค่าคงตัวควบคุมในที่นี้

สมมุติให้ ช่วงควบคุม  $\pm 2.5$  ซม เป็นค่า Trace และจากสมการ 5.1

$$\omega = k \cdot \text{Trace} + \beta \frac{d\text{Trace}}{dt}$$

$$\text{ให้ } \frac{d\text{Trace}}{dt} = 0$$

$$\therefore \omega = k \cdot \text{Trace}$$

$$k = \frac{\omega}{\text{Trace}} \approx -0.33$$

8.2.5 ค่าคงตัวการถ่วง (β) ใช้สมมุติฐานเกี่ยวกับ หัวข้อ 8.2.4 และจาก ภาพที่-49

$$k = -10K/2.2K = -4.5454$$

$$\beta = -RC = -10K \times 22\mu F = -2.2$$

โดยการเทียบสัดส่วน และให้ค่า k เป็น -0.33 ทั้งในหัวข้อ 8.2.4 จะได้ว่า

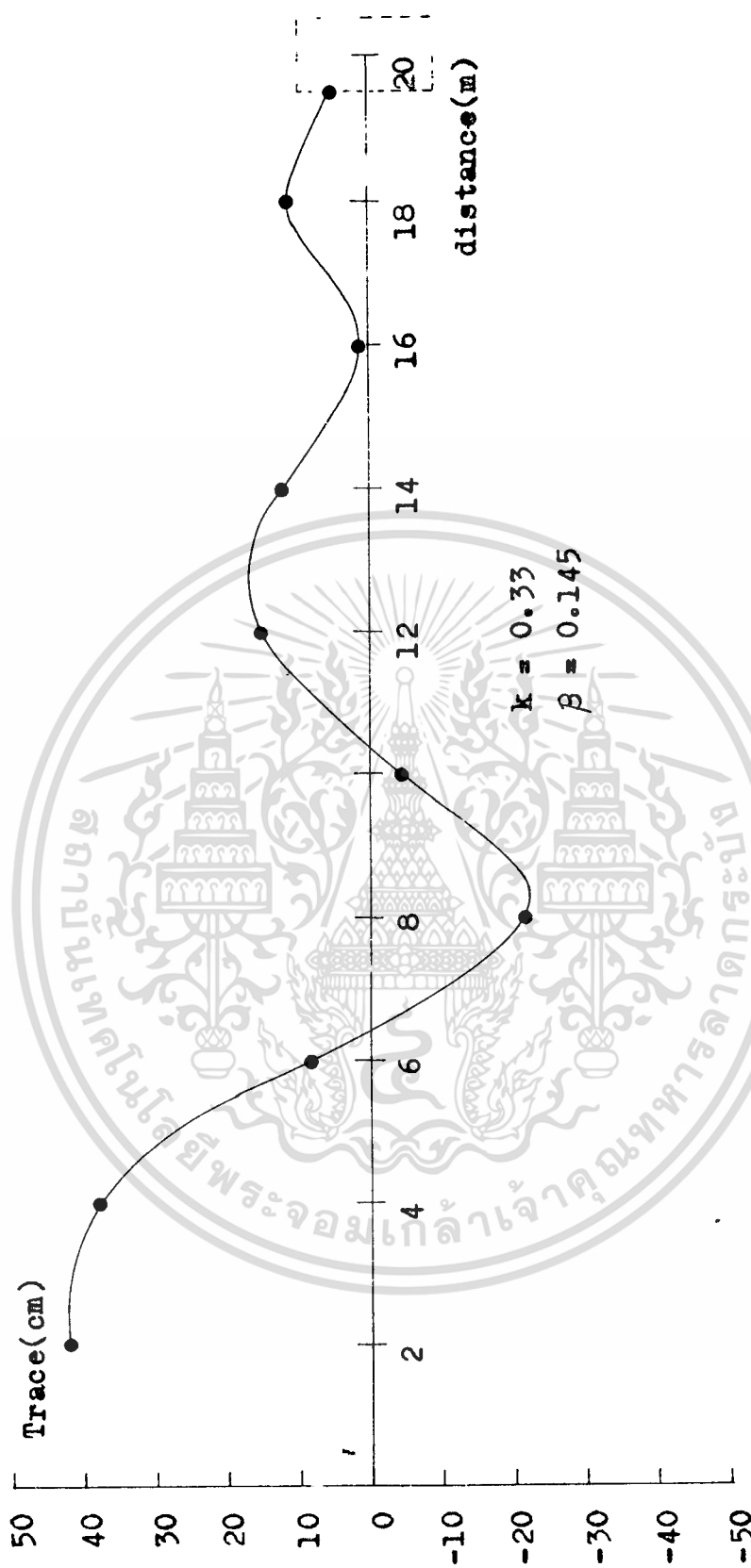
$$\beta = -0.14$$

### 8.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองตามที่ได้แสดงแผนผังไว้ใน ภาพที่-52 บันทึกผลโดยใช้กินสอคิดไว้ ห้ายรถ และวงทดลองบนพื้นหินชอล์กเรียบ แสดงไว้ใน ภาพที่-53

จะเห็นได้จากผลการทดลองใน ภาพที่-53 วิถีจรวดมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการคำนวณใน บท ก่อนๆ แต่จะสังเกตได้ว่า ความถี่ของวิถีวงวนค่าลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณที่มีค่า พารามิเตอร์ ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจาก มุมกระจายออก ในทางปฏิบัติไม่เป็นศูนย์จึงทำให้ผลจากการคำนวณความคลาดจากที่คำนวณได้ในหัวข้อ 8.2.4

ส่วนวิถีที่ระยะทาง 16 เมตร ซึ่งควรจะมีคาบ แต่มีค่า 1ชม นั้นเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของผู้ควบคุม ซึ่งได้ใจคนเลือกวิถีนี้มาแสดงใน ภาพที่-53 สำหรับวิถีที่เกิดขึ้นจากการทดลองหลายๆครั้งนั้น อาจแตกต่างกันไปบ้างแต่ก็ให้ค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่-53 แสดงผลการทดลองจริง โดยใช้รบบังคับวิทยุกับเป้าหมายบนพื้นดิน

บทที่ 9  
บทสรุป

ส่วนที่สองของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษา "ระบบควบคุมจรวดนำวิถี" แบบปฏิบัติตามคำสั่ง ที่ได้พิจารณาแล้วคาดว่าจะให้ผลการทำงานดี เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงความจำเป็นในการใช้วิจารณ์ฐานส่วนบุคคลของผู้ควบคุม และยังมีราคาไม่สูงเกินไปนัก

การคำนวณโดยวิธี Numerical calculation ที่ได้ทำไว้นั้นเป็นแนวทางเบื้องต้น เพื่อศึกษาลงของ พารามิเตอร์ ต่างๆที่จำเป็นหรือต้องการทดสอบกับระบบควบคุม และยังเป็น การหาค่าตอบในบางรูปแบบซึ่งยังไม่สามารถตั้งสมการคำนวณหาค่าตอบได้โดยตรง

สำหรับการคำนวณโดยวิธี Laplace model นั้นมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาระบบควบคุม โดยละเอียด เป็นความพยายามที่จะหาค่าตอบ (solution) ของระบบโดยไม่ต้องการอาศัย การเคาะสุ่มแบบที่ใช้อยู่กับการคำนวณในแบบ Numerical calculation แต่บางครั้ง ก็ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากการคำนวณหาค่าตอบโดยตรงทางคณิตศาสตร์อาจจะ ยุ่งยากเกินไป

อนึ่งสำหรับการที่จะสรุปว่า ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้งานกับจรวดนำวิถีได้จริงหรือไม่ ยังเป็นเรื่องที่ค่อนข้างจะห่างไกลอีกมาก เนื่องจากเรายังไม่มีประสบการณ์ในการปฏิบัติจริงที่ เพียงพอ จึงหวังว่าขั้นตอนการศึกษาระบบนำวิถีที่ห้ามานี้ จะได้เป็นการเริ่มต้นที่ดีสำหรับการ คำนึงโครงการต่อไปในอนาคต

หนังสืออ้างอิง

1. P. Garnell and D.J. East "Guided Weapon Control System" Pergamon Press 1977.
2. Erwin Kreyszig "Advance Engineering Mathematics" Third Edition John Wiley and Sons, 1972.
3. Jerald G. Graeme "Applications of Operational Amplifiers" Mc Graw Hill 1973.
4. J. G. Truxal "Automatic Feedback Control System Synthesis" Mc Graw Hill 1955.
5. Robert Resnick and David Haliday "Physics" John Weiley and Sons 1966.
6. T. D. Towers "Colour Receiver Techniques" ILIFFE Books 1968.
7. Bernard Grob "Basic Television" Third Edition Mc Graw Hill 1964.