การใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

Computer Aided Analysis of Control Systems

นิพนธ์ แซ่จง

Nipon Sae-Chong

เลขหมู่ QA 402.3 N63 2539 ค.2
Bib Key 204765
13 ส.ค. 2543

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2539

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

ผู้เขียน นายนิพนธ์ แซ่จง

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ตันตระรุ่งโรจน์)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ตันตระรุ่งโรจน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลียง คูบุรัตถ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัชฌา ธีรเชษฐมงคล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ดร.ไพรัตน์ สงวนไทร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ธนนุช คุณหญิงกลม ธรรมพระวิสุทธิ์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่
ได้รับจาก
บัณฑิตวิทยาลัย 20
วันที่ เดือน 3 ธ.ค. 2543

ชื่อวิทยานิพนธ์	การใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม
ผู้เขียน	นายนิพนธ์ แซ่จง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบควบคุมแบบเชิงเส้น อันประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยกราฟทั้งสี่แบบในเวลาเดียวกัน คือ กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา (time response plot) กราฟโบเด (Bode plot) กราฟโพลาร์ (polar plot) และกราฟทางเดินของราก (root locus plot) ซึ่งการวิเคราะห์จะอำนวยความสะดวกต่อนักศึกษาในการศึกษาตีความข้อแตกต่างระหว่างกราฟทั้งสี่ แผนภาพกล่องของระบบจะประกอบด้วย ตัวควบคุม D(s) กำลังขยาย K ส่วนที่ถูกควบคุม G(s) และตัวแปลงสัญญาณ H(s) โดยตัวยกกำลังของ D(s) และ H(s) จะต้องไม่เกินสอง และไม่เกินสาม สำหรับ G(s) สัญญาณเข้าอ้างอิงสมมติให้เป็นสัญญาณแบบขั้น ระบบสามารถถูกวิเคราะห์ในรูปวงจรเปิดและวงจรปิด ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบสามารถถูกป้อนเป็นข้อมูลเข้าในรูปฟังก์ชันตัวประกอบหรือฟังก์ชันพหุนาม โปรแกรมนี้ถูกพัฒนาในรูปโมดูล โดยใช้ภาษาไมโครซอฟท์วิชวลเบสิก 3.0 ซึ่งเป็นภาษาที่อำนวยความสะดวกในการทำงานกับข้อมูลทั้งที่เป็นข้อความและรูปภาพ และในการปรับเปลี่ยนโปรแกรมให้เป็นไปตามความต้องการใหม่ในอนาคตได้ง่าย

Thesis Title	Computer Aided Analysis of Control Systems
Author	Mr. Nipon Sae-Chong
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	1995

Abstract

This thesis is the development of a computer program for analysis of Linear Control System. The objective of this thesis is to study and analyze four plots which are continuous-time system response plot , Bode plot, polar plot and root locus plot at the same time. It is convenient for students to study and interprete what are the differences among these four plots. The block diagrams of the system will consist of controller D(s), gain K, Plant G(s), and Transducer H(s). The orders of D(s) and H(s) are limited to not greater than two, and not greater than three for G(s). The reference input is assumed to be step input function. The system can be analyzed in open-loop and closed-loop systems. The transfer functions of the system can be given in the form of factor or polynomial. This program is developed on Microsoft Visual Basic 3.0 which is user friendly programming language and can be easily modified for the future development.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความซอบคุณต่อ อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ ประธานกรรมการที่ปรึกษา, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ตันตระรุ่งโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม, ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลียง คูบุรัตถ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัชฌา ธีรเชษฐมงคล, คณะกรรมการสอบ, คุณสันติ จันทโชติ, คุณเปรีชาพล บุญส่ง ที่กรุณาให้ข้อมูลและคำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการทำวิทยานิพนธ์, ขอซอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม-ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และให้หยิบยืมอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ในการทำวิจัย, บริษัทบ้านซอฟท์แวร์จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ด้านคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ และ คุณฐาทิพย์ ศรีบริรักษ์ ที่ได้ช่วยจัดพิมพ์ต้นฉบับ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบซอบพระคุณบิดา มารดา และขอขอบคุณพี่ น้อง ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นิพนธ์ แซ่จง

สารบาญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบาญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(11)
อภิธานศัพท์	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
ความเป็นมาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย	2
วิธีดำเนินการวิจัย	3
2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม	4
การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงเวลา	4
การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงความถี่	8
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ	13
3. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม	17
ซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม	17
การออกแบบโปรแกรม	19
การพัฒนาโปรแกรม กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา	27
การพัฒนาโปรแกรม กราฟทางเดินของราก	35
การพัฒนาโปรแกรม กราฟโพลาร์	37
การพัฒนาโปรแกรม กราฟโบเด	40

หน้า

4. ผลการวิจัย 42

ข้อกำหนดของระบบ 42

การเตรียมแผ่นจานบันทึกติดตั้งโปรแกรม 42

การติดตั้งโปรแกรม 47

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม 49

สรุปผลและข้อเสนอแนะ 61

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบ 62

บรรณานุกรม 63

ประวัติผู้เขียน 65

รายการตาราง

ตาราง หน้า

1. แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ $Z^{(x,y)}$ 32

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. การทดสอบของสัญญาณเข้าพาราโบลาอันดับ m ในกรณีที่ m=0, 1 และ 2	6
2. กราฟของผลตอบสนองเชิงเวลา ของระบบควบคุมที่ใช้ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (unit step function) เป็นสัญญาณเข้า	7
3. เส้นโค้งขยายของ ระบบเซอร์โว หรือผลตอบสนองวงจรรอบปิดเชิงความถี่ (close-loop frequency response)	9
4. กราฟโพลาร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนในระบบควบคุม	13
5. แผนภาพกล่องของระบบควบคุม	15
6. รูปแสดงลักษณะของเกณฑ์เชิงมุม (angle criterion)	16
7. สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก	25
8. แสดงการหาความชันของสัญญาณที่เวลาใด ๆ	27
9. สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา	34
10. สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟทางเดินของราก	36
11. กราฟจุด (x,y) จาก M, θ	38
12. สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟโพลาร์	39
13. สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟโบเด	41
14. แสดงไอคอน (icon) ของ Application Wizard	43
15. แสดงหน้าจอแรกของ Setup Wizard	43
16. แสดงหน้าจอที่ 2 ของ Setup Wizard	44
17. แสดงหน้าจอที่ 4 ของ Setup Wizard	44
18. แสดงหน้าจอที่ 5 ของ Setup Wizard	45
19. แสดงหน้าจอที่ 6 ของ Setup Wizard	46
20. แสดงหน้าจอเสร็จสิ้นการเตรียมแผ่นจานบันทึกเพื่อการติดตั้ง	46
21. แสดงหน้าจอแรกของการติดตั้ง	47
22. แสดงหน้าจอการเรียกหาแผ่นที่ 2	48
23. แสดงหน้าจอเสร็จสิ้นการติดตั้ง	48
24. แสดงไอคอน (icon) ในกลุ่มของระบบควบคุม	49

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
25. แสดงหน้าจอการเลือกรูปแบบระบบ	49
26. แสดงหน้าจอการเลือกรูปแบบสูตร	50
27. รูปแบบหน้าจอสมการระบบแบบพหุนาม	50
28. รูปแบบหน้าจอสมการระบบแบบตัวประกอบ	51
29. แสดงหน้าจอบันทึกค่ากำลังขยายคงที่	52
30. แสดงหน้าจอบันทึกสมการของระบบหลัก	52
31. แสดงหน้าจอบันทึกสมการของตัวปรับระบบหรือระบบป้อนกลับ	53
32. แสดงหน้าจอหลักของระบบควบคุม	54
33. แสดงหน้าจอของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา	55
34. แสดงหน้าจอกำหนดช่วงของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา	56
35. แสดงหน้าจอของกราฟทางเดินของราก	56
36. แสดงหน้าจอกำหนดช่วงค่า K ของกราฟทางเดินของราก	57
37. แสดงหน้าจอของกราฟโพลาร์	58
38. แสดงหน้าจอกำหนดความถี่ของกราฟโพลาร์	58
39. แสดงหน้าจอสมการกราฟโบเด	59
40. แสดงหน้าจอกำหนดความถี่ของกราฟโบเด	59
41. แสดงหน้าจอการแสดงกราฟแบบ cascade	60
42. การแสดงกราฟแบบ title	60

ตัวย่อและสัญลักษณ์

BW	=	Band Width
FVE	=	Final Value of Error
M_p	=	Peak resonance
OOP	=	Object Oriented Programming
PO	=	Percent Overshoot
PS	=	Performance Specification
T_d	=	Time delay
Tr	=	Rise time
T_s	=	Settling time
W_c	=	Cut off frequency
W_p	=	Resonance frequency

อภิธานศัพท์

absolute stability	เสถียรภาพสมบูรณ์
characteristic roots	รากของสมการคุณลักษณะ
close-loop transfer function	ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบปิด
control systems	ระบบควบคุม
differential equation	สมการเชิงอนุพันธ์
frequency domain	เชิงความถี่
linear time-invariant system	ระบบควบคุมเชิงเส้น
manitude	ขนาด
order	อันดับ
phase	เฟส
pole	โพล
source code	ซอร์สโค้ด
steady-state response	ผลตอบสนองในภาวะอยู่ตัว
system accuracy	ความแม่นยำของระบบ
time domain	เชิงเวลา
time response	ผลตอบสนองเชิงเวลา
transfer function	ฟังก์ชันถ่ายโอน
transient response	ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่
visual programming	วิชวลโปรแกรมมิ่ง

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

การวิเคราะห์ระบบควบคุมคือ การสำรวจตรวจสอบระบบควบคุมที่กำหนดให้ ซึ่งทราบค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบของระบบอย่างครบถ้วน และนำค่าต่าง ๆ ที่ทราบเหล่านี้มาศึกษาถึงคุณสมบัติและการทำงานของระบบควบคุมภายใต้สภาวะต่าง ๆ การวิเคราะห์ระบบควบคุมในโครงการวิจัยนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ระบบควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ซึ่งได้มาจากการแทนหรือจำลองระบบควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น สมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) และฟังก์ชั่นถ่ายโอน เป็นต้น การวิเคราะห์ระบบควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ทั้งในเชิงเวลา (time domain) เช่น การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบเชิงเวลา (time response analysis) โดยใช้วิธีการของปริภูมิสถานะ (state space) เป็นต้น และการวิเคราะห์ในเชิงความถี่ (frequency domain analysis) เช่น การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบเชิงความถี่ (frequency response analysis) ซึ่งใช้วิธีการของกราฟโบเด และการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการของ กราฟโพลาร์ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของระบบควบคุมโดยใช้วิธีการ กราฟทางเดินของราก เป็นต้น

วิธีการวิเคราะห์ระบบควบคุม ตามที่กล่าวมาจะเป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่มีรายละเอียดในการวิเคราะห์ที่ยุ่งยากสลับซับซ้อน มีเงื่อนไขต่าง ๆ มาก มีงานคำนวณที่ต้องทำซ้ำกันหลายครั้ง ซึ่งถ้าหากใช้การวิเคราะห์ด้วยมือจะใช้เวลานาน นอกจากนี้แล้วหากต้องการนำไปวาดกราฟ เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้นอีก ในการวาดกราฟของการวิเคราะห์แต่ละครั้ง หรือ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลง แก้ไขสมการที่เป็นแบบจำลองของระบบใหม่ ต้องเริ่มทำการวิเคราะห์ใหม่ ทำให้การวิเคราะห์ต้องใช้เวลานานและมีโอกาสผิดพลาดได้ จากปัญหาเหล่านี้ คอมพิวเตอร์จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ เนื่องจากสามารถช่วยลดการทำงานที่ยุ่งยากสลับซับซ้อน ทำงานคำนวณที่ซ้ำซาก และการทำงานด้านกราฟิกในการวาดกราฟต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วในปัจจุบันเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีสมรรถนะสูง สามารถทำงานด้านคำนวณต่าง ๆ และการวาดภาพทางกราฟิกได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นยังมีราคาถูกและใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม ให้ทำงานได้ดีบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC/XT, IBM PC/AT, IBM PS/2 และ

IBM compatible ทั่วไปที่สามารถ ใช้งาน WINDOWS และมีความจำหลักบนบอร์ดอย่างต่ำ 8 M เพื่อให้โปรแกรมที่จัดทำขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอน และเหมาะสำหรับผู้ที่สนใจ ด้านการวิเคราะห์ระบบควบคุมทั่วไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม ในรูปกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอน ทั้งในเชิงเวลาและเชิงความถี่ รวมทั้งหมด 4 แบบด้วยกัน คือ กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา, กราฟโบเด, กราฟโพลาร์ และ กราฟทางเดินของราก โดยให้โปรแกรมสามารถทำงานได้ดีบนเครื่อง ไมโครคอมพิวเตอร์ ที่สามารถใช้งาน WINDOWS ได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. โปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาครอบคลุมการแสดงผลในรูปกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอน ในความสัมพันธ์ของ

กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

กราฟโบเด

กราฟโพลาร์

กราฟทางเดินของราก

โดยให้การแสดงผลทางจอภาพได้พร้อมกันทั้ง 4 แบบ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบ การวิเคราะห์แต่ละวิธีได้

2. โปรแกรมที่พัฒนาสามารถแสดงผลเพียงรูปกราฟใดรูปกราฟหนึ่ง โดยผู้ใช้สามารถปรับช่วงของแกนราบและความละเอียดของช่วงกราฟได้

3. ระบบที่จะวิเคราะห์มีลักษณะเป็น ระบบควบคุมเชิงเส้น (linear time-invariant system) ที่มีอันดับไม่ต่ำกว่า 3

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. ได้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ระบบควบคุม
2. ใช้โปรแกรมนี้ประกอบการเรียนการสอน วิชาระบบควบคุม
3. นักศึกษาสามารถศึกษาระบบควบคุมด้วยตนเองเพิ่มเติมโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์
4. สามารถใช้โปรแกรมนี้ช่วยในการวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุด หรือ เหมาะสมที่สุดในการออกแบบระบบ

5. สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปกราฟทั้ง 4 แบบ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมสูตรกราฟต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อแสดงรูปกราฟสำหรับการวิเคราะห์ทั้ง 4 แบบ
2. กำหนดรูปแบบของการแสดงรูปกราฟทางจอภาพ
3. กำหนดรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนรับเข้า ที่จะต้องใช้ในการวิเคราะห์
4. กำหนดรูปแบบของการพิมพ์ผลลัพธ์ออกทางเครื่องพิมพ์
5. ออกแบบและเขียนโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบควบคุมตามสูตรในข้อ 1
6. ทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาจนสามารถทำงานได้ถูกต้อง
7. เขียนรายงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้น หลังจากได้มีการจำลองระบบควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ นั่นหมายความว่า สามารถที่จะศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติและผลตอบสนองต่างๆ ของระบบได้ด้วย วิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและปลอดภัย

ในการจำลองระบบควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์นั้น โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเวลาหรือในรูปของสมการอนุพันธ์ แบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับระบบนั้น ๆ การศึกษาและวิเคราะห์ระบบควบคุมเป็นการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งแทนรูปแบบจำลองของระบบการวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงเวลา
2. การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงความถี่
3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงเวลา

วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาจะใช้ผลตอบสนองของระบบที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา เป็นตัวพิจารณา เพราะในระบบควบคุมนั้นต้องการให้ตัวแปรสัญญาณออกติดตามสัญญาณเข้าไปอย่างใกล้ชิด ซึ่งถ้าให้ผลตอบสนอง เป็นฟังก์ชันของเวลาก็จะสามารถนำเอาสัญญาณออกไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเข้าได้ตลอดเวลา

การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงเวลาของระบบจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ

– ส่วนวิเคราะห์ลักษณะของผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ (transient response)

– ส่วนวิเคราะห์ลักษณะของผลตอบสนองในภาวะอยู่ตัว (steady-state response)

โดยมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$c(t) = c_t(t) + c_{ss}(t) \qquad (2.1)$$

เมื่อ $c(t)$ เป็นผลตอบสนองเชิงเวลา $c_t(t)$ เป็นผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ และ $c_{ss}(t)$ เป็นผลตอบสนองภาวะอยู่ตัว คำจำกัดความของ ภาวะอยู่ตัว ยังไม่เป็นมาตรฐาน ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าส่วนมาก ภาวะอยู่ตัว จะหมายถึงค่าคงที่ ส่วนในระบบควบคุม ภาวะอยู่ตัว จะหมายถึงผลตอบสนองเมื่อเวลามีค่าเข้าใกล้อนันต์ (infinity) ดังนั้นคลื่นไซน์ (sine wave) จะเป็นภาวะอยู่ตัวได้ เพราะว่าจะมีค่าเป็นคลื่นไซน์ตาม

เดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ t เข้าใกล้ ∞ ภาวะชั่วครู่เป็นส่วนหนึ่งของผลตอบสนอง ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเวลามีค่าเข้าใกล้อนันต์ ดังนั้น $c_t(t)$ จะมีคุณสมบัติดังนี้

$$\lim_{t->\infty} c_t(t) = 0 \qquad (2.2)$$

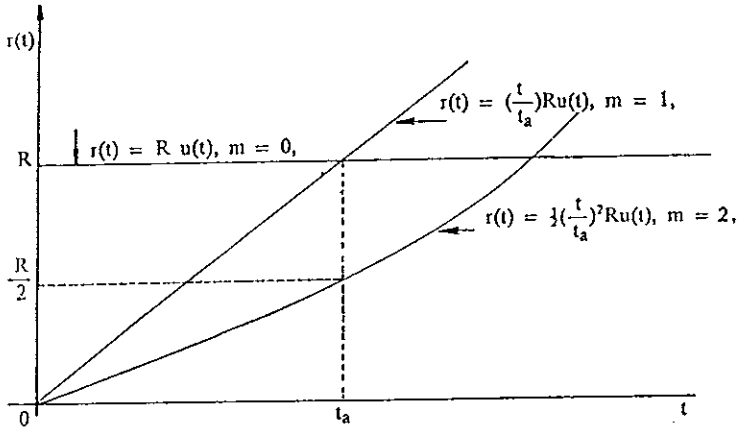
เนื่องจากจะมีความเฉื่อยและความฝืดอยู่ในระบบควบคุมเสมอ ทำให้สัญญาณออกไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าอย่างทันทีทันใด และสังเกตเห็นผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ ที่เกิดขึ้นนี้มีรูปร่างคล้ายผลตอบสนองคลื่นดล (impulse response)

ผลตอบสนองภาวะอยู่ตัว เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเข้า จะให้ผลที่แสดงถึงความเที่ยงตรงของระบบ ถ้าสัญญาณออกของผลตอบสนองภาวะอยู่ตัวไม่ติดตามสัญญาณเข้าอย่างถูกต้องจะเกิดค่าคลาดเคลื่อนในภาวะอยู่ตัว (steady-state error หรือ final value of error = FVE) คือค่าสัญญาณออกผิดพลาดที่เกิดขึ้นในภาวะอยู่ตัว

ในทางปฏิบัติ สัญญาณเข้าที่ป้อนเข้าระบบควบคุมจะแปรค่าอย่างไม่แน่นอน ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าเช่น ระบบ radar tracking ซึ่งตำแหน่งและความเร็วของเป้า (เครื่องบินจรวด ฯลฯ) จะเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบได้จากฟังก์ชันของสัญญาณเข้ามาตรฐานหรือสัญญาณทดสอบที่ป้อนเข้า และในการออกแบบระบบควบคุมจะมีการพิสูจน์หาสมรรถนะจากสัญญาณทดสอบเหล่านี้ เพื่อเอาไว้เป็นมาตรฐานในการออกแบบสัญญาณมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบในเชิงเวลา จะใช้สัญญาณเข้าแบบพาราโบลิคอันดับที่ m ดังนี้

$$r(t) = \left(\frac{t}{t_a}\right)^m \frac{Ru(t)}{m!} \qquad m = 0,1,2 \qquad (2.3)$$

เมื่อ t_a เป็นค่าใด ๆ r(t) คือสัญญาณเข้า Ru(t) คือสัญญาณคงที่ ณ เวลา t และเมื่อ



ภาพประกอบ 1 ภาพ การทดสอบของสัญญาณเข้าพาราโบลาอันดับ m ในกรณีที่ m=0,1 และ 2

m = 0 จะให้สัญญาณเป็นแบบ step displacement ดังสมการ(2.4)

$$r(t) = R\,u(t) \tag{2.4}$$

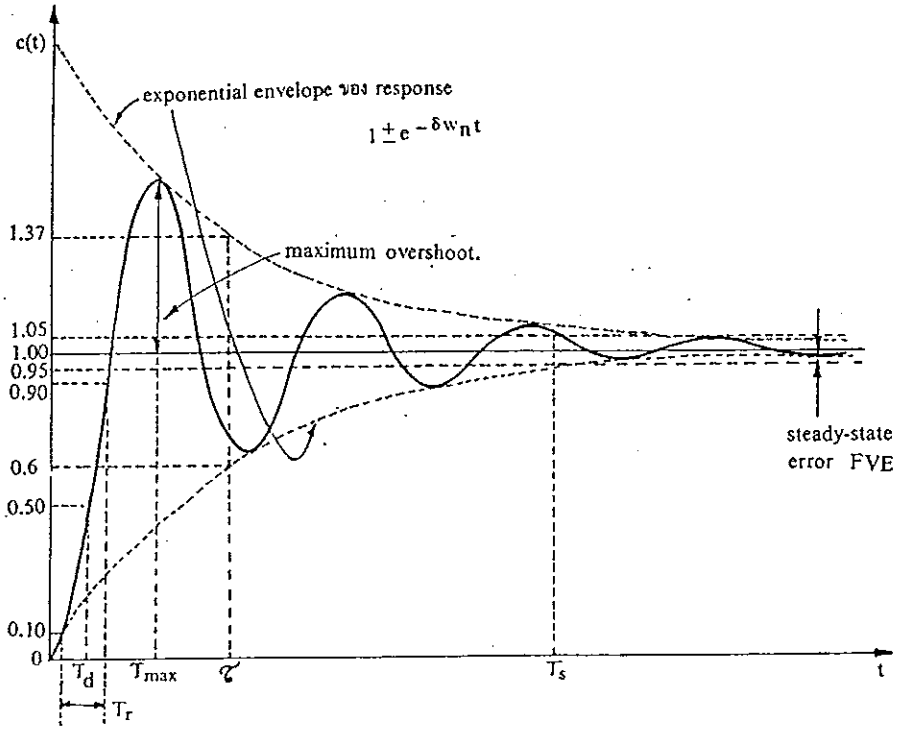
m = 1 จะให้สัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นความเร็ว (step velocity) หรือฟังก์ชันแรมป์ (ramp function) ดังสมการ(2.5)

$$r(t) = \frac{t}{t_a} R\,u(t) \tag{2.5}$$

m = 2 จะให้สัญญาณเข้าเป็นแบบความเร่ง (acceleration) หรือ ฟังก์ชันพาราโบลา (parabolic function) ดังสมการ (2.6)

$$r(t) = \left(\frac{t}{t_a}\right)^2 \frac{R}{2}\,u(t) \tag{2.6}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนในภาวะอยู่ตัวของการวิเคราะห์ลักษณะของผลตอบสนองในภาวะอยู่ตัว เป็นการวัดความแม่นยำของระบบ (system accuracy) เมื่อป้อนสัญญาณเข้าแบบใดแบบหนึ่งเข้าไปในระบบควบคุม ในการวิเคราะห์ลักษณะของผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ ตามปกติจะใช้ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย เป็นสัญญาณเข้าอ้างอิงในการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองขั้น (step response) ดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดย



ภาพประกอบ 2 กราฟของผลตอบสนองเชิงเวลา ของระบบควบคุมที่ใช้ ฟังก์ชันหนึ่งหน่วยเป็นสัญญาณเข้า

โอเวอร์ชูต (overshoot) สูงสุด เป็นค่าแตกต่างสูงสุดระหว่างสัญญาณเข้ากับสัญญาณออกในภาวะชั่วครู่ ณ เวลา T_{max} ซึ่งอาจใช้วัดเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ และจะคำนวณหาโอเวอร์ชูตได้จาก

$$\text{Percent overshoot (PO)} = \frac{\text{maximum overshoot}}{\text{Final desired value}} \times 100 \qquad (2.7)$$

ช่วงเวลาประวิง (delay time) T_d เป็นเวลาที่ต้องการ สำหรับผลตอบสนอง มีค่า 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าสุดท้าย

ช่วงเวลาขึ้น (rise time) T_r เป็นเวลาที่ต้องการสำหรับ ผลตอบสนองมีค่าจาก 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป หาค่า 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าสุดท้าย บางครั้ง จำกัดความว่า เป็นส่วนกลับของความชันผลตอบสนองขณะที่ผลตอบสนองมีค่า 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าสุดท้าย

ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) T_S เป็นเวลาที่ ต้องการสำหรับผลตอบสนองที่จะลดค่าลงอยู่ภายในพิสัย (range) ที่กำหนดให้เป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าสุดท้าย โดยปกติมักใช้ 2 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์

ค่าคงตัวทางเวลา (predominant time constant) τ เป็นค่าคงที่เวลาของ ผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ ของผลตอบสนองสัญญาณเข้าหนึ่งหน่วยได้ลดค่าของเอนวีโลป (envelope) ลงเหลือ 37 เปอร์เซ็นต์ (หรือ e^{-1}) ของค่าเริ่มต้น สำหรับระบบควบคุมที่มี อันดับ 2 หรือสูงกว่าแต่สามารถประมาณค่าให้เป็นอันดับ 2 และเป็นกรณีหน่วยเวลาน้อยเกินไป (under damped) จะคำนวณหาค่าคงที่เวลา τ นี้ได้จากสมการ (2.8)

$$\tau \leq \frac{1}{\delta w_n} \tag{2.8}$$

δw_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์เวลา t ในเอกซ์โพเนนเชียลเอนวีโลป exponential envelop ของผลตอบสนอง

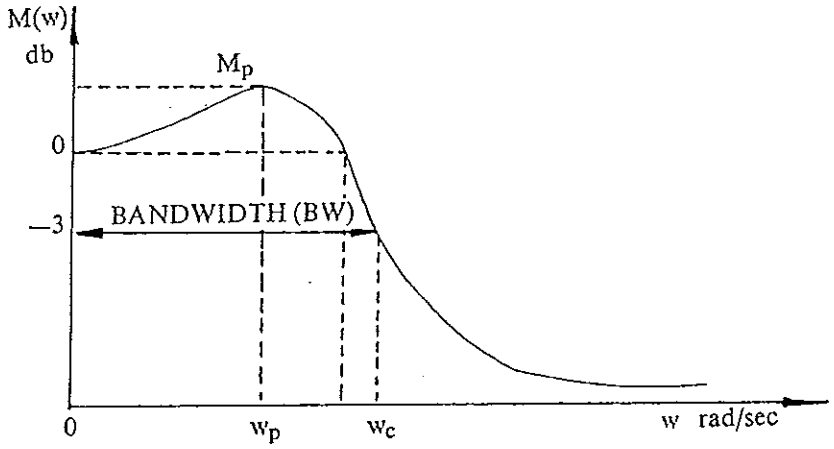
การวิเคราะห์ผลตอบสนองในเชิงความถี่

ในการวิเคราะห์ระบบควบคุมในเชิงเวลานั้นจะสามารถบอกรายละเอียดต่าง ๆ ได้ดี แต่การคำนวณนั้นจะยุ่งยากมาก สามารถทำให้ง่ายลงโดยใช้คอมพิวเตอร์เชิงอุปมาน (analog computer) แต่ยังไม่เป็นการ สะดวกนัก ในสมัยเริ่มแรกนิยมใช้วิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งเป็นวิธีกราฟแบบต่างๆ เช่น กราฟโบเด แล้วแปลความหมายให้เป็นระบบในเชิงเวลา และ วิธี กราฟโพลาร์

สัญญาณมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบในเชิงความถี่ จะใช้สัญญาณเข้าเป็นรูปกราฟแบบไซน์ ที่เปลี่ยนความถี่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ อัตราส่วนขนาด และขยับเฟส (phase shift) ระหว่างสัญญาณเข้ากับสัญญาณออก เป็นฟังก์ชันกับความถี่และพฤติกรรมของระบบในเชิงเวลาได้จากระบบในเชิงความถี่และจะเขียนสัญญาณรูปกราฟแบบไซน์ ได้ดังนี้

$$r(t) = R\sin \omega t \tag{2.9}$$

และการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของ ระบบควบคุมในเชิงความถี่ พิจารณาได้จากรูปกราฟใน ภาพประกอบ 3 โดย M(w) แทนขนาดของผลตอบสนองเชิงความถี่



ภาพประกอบ 3 เส้นโค้งขยายของ ระบบเซอร์โว หรือ ผลตอบสนองวงจรรอบปิดเชิงความถี่

จากรูปกราฟในภาพประกอบ 3

แถบความกว้าง (bandwidth BW) เป็นระยะความถี่ของ M(w) ซึ่งขนาดได้ลดค่าลงจากค่าที่ความถี่ศูนย์เหลือเพียง 70.7 เปอร์เซ็นต์ของค่านั้น หรือ 3 db ต่ำจากระดับของค่าที่ความถี่เป็นศูนย์ โดยทั่ว ๆ ไปแถบความกว้าง จะแสดงคุณสมบัติของการกรองสัญญาณรบกวนของระบบ และแถบความกว้างให้ค่าการวัดคุณสมบัติของผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ด้วย คือ แถบความกว้าง ใหญ่ แสดงว่าสัญญาณความถี่สูงจะผ่านไปถึงสัญญาณออกได้ ดังนั้นผลตอบสนองภาวะชั่วครู่จะมี ช่วงเวลาขึ้น ที่เร็วมากร่วมกับโอเวอร์ชูต สูง กลับกัน ถ้า แถบความกว้าง เล็ก สัญญาณความถี่ต่ำเท่านั้นที่จะผ่านไป ได้ ดังนั้น ผลตอบสนองตามเวลาจะช้า และเกิดการแกว่งของสัญญาณออก เมื่อเวลาผ่านไป

เรโซแนนซ์ค่ายอด (peak resonance M_p) เป็นค่าสูงสุดของ M(w) ซึ่งจะแสดงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ

เรโซแนนซ์ความถี่ (resonance frequency W_p) เป็นค่าความถี่ตรงที่ เรโซแนนซ์ค่ายอดได้เกิดขึ้น

อัตราการตัด (cut off rate W_c) เป็นอัตราการลดลงของเส้นโค้งของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ความถี่สูง ถ้ามีอัตราการลดลงสูง เส้นโค้งทางความถี่สูงชันมาก แสดงว่าสามารถตัดสัญญาณรบกวนออกจากระบบได้ดี แต่จะแสดงว่า M_p มีค่าสูง ซึ่งหมายความว่าระบบไม่ค่อยเสถียร

การแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ด้วยกราฟโบเด เป็นลักษณะของกราฟที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ง่ายและสะดวก ซึ่งส่วนใหญ่แล้วกราฟที่ได้มักจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม และการออกแบบระบบควบคุมหรือวงจรกรอง ในความเป็นจริง การหาผลตอบสนองเชิงความถี่คือการ หาผลตอบสนองในภาวะเสถียรของสัญญาณแบบไซน์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน H(s) โดยแทน $s = jw$

ตามปกติกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอน H(s) จะแสดงทั้งขนาดและมุมโดยที่ H(s) จะวัดในหน่วยของเดซิเบล ใช้สัญลักษณ์ $|H|_{db}$

$$|H|_{db} = 20 \log_{10}|H| \tag{2.10}$$

เหตุผลสองประการที่สำคัญในการใช้สเกลล็อก (log) ในการวาดกราฟ คือ

1. เนื่องจาก หากวาดกราฟโดยใช้สเกลปกติ จะทำให้ช่วงกว้างของความถี่และขนาดของกราฟมีค่าสูง ทำให้กราฟมีขนาดใหญ่ การวาดกราฟด้วยสเกลล็อก จะช่วยให้กราฟที่ได้มีขนาดเล็กลง ทำให้การวิเคราะห์ และการวาดกราฟมีความสะดวกมากขึ้น

2. การใช้ค่าในสเกลล็อก จะทำให้การคำนวนต่างๆ ทำได้ง่ายและรวดเร็ว ถ้ากำหนด ให้ระบบที่วิเคราะห์มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นก้อน (lump) และไม่ขึ้นกับเวลา ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็นฟังก์ชันตรรกยะ (rational function) โดย H(s) สามารถเขียนแทนด้วยฟังก์ชันเศษส่วนดังสมการ (2.11)

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \tag{2.11}$$

เมื่อ P(s) และ Q(s) เป็นฟังก์ชันพหุนาม ในรูปของ s ดังนั้น H(s) สามารถจะเขียน ให้อยู่ในรูปแบบมาตราฐานต่าง ๆ ดังนี้

1. ตัวประกอบคงที่ (constant factor) K
2. โพล (poles) หรือ ศูนย์ (zeros) ที่จุดเริ่มต้น $s^{\pm n}$
3. โพลจริงหรือศูนย์ $(Ts+1)^{\pm n}$
4. โพลสังยุคเชิงซ้อน (complex - conjugate poles) หรือ ศูนย์ $(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)^{\pm n}$
   เมื่อ ξ เป็นอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) และ $0 < \xi < 1$

การวาดกราฟขนาดของ H(s) ในหน่วยเดซิเบล ทำให้สามารถวาดกราฟของแต่ละตัวประกอบของ H(s) แยกกันได้ จากนั้นเมื่อนำกราฟของแต่ละตัวประกอบมารวมกันวาดเป็นกราฟผลรวม กราฟที่ได้จะเป็นกราฟขนาดของ H(s) ผลตอบสนองเชิงความถี่ในลักษณะนี้ เรียกว่า กราฟโบเด ซึ่งคิดค้นโดย H.W. Bode ซึ่งเป็นผู้สร้าง และใช้งานกราฟลักษณะนี้ในการวิเคราะห์วงจรขยายป้อนกลับ ในขณะที่ทำงานใน Bell Laboratories

การวาดกราฟเฟส ของ H(s) ก็ใช้วิธีลักษณะเดียวกับขนาดของ H(s) คือ การหาผลรวมของกราฟแต่ละตัวประกอบ ซึ่งกราฟผลรวมที่ได้คือกราฟเฟสของ H(s) สามารถพิสูจน์ได้จากความจริงที่ว่ามุมของผลคูณของจำนวนจินตภาพเท่ากับผลรวมของมุมของจำนวนจินตภาพนั้น

เนื่องจาก การหากราฟผลรวมของ H(s) จากแต่ละตัวประกอบมารวมกันจำเป็นต้องมาวิเคราะห์ ถึงคุณสมบัติของแต่ละตัวประกอบของ H(s) ว่ามีอะไรบ้าง

1. ตัวประกอบคงที่ K จะได้

$$|K|_{db} = 20 \log_{10}|K| \tag{2.12}$$

ซึ่ง $|K|_{db}$ เป็นค่าคงที่ กราฟที่ได้เป็นกราฟเส้นตรงในแนวนอน ส่วนเฟสจะมีค่า เป็นศูนย์ หรือ $\pm 180^{o}$ ขึ้นกับค่า K ว่ามีค่าเป็นบวกหรือลบ ดังนั้นกราฟของเฟสจึงเป็นกราฟเส้นตรงในแนวนอน เช่นเดียวกัน

2. โพลหรือศูนย์ที่จุดเริ่มต้น $s^{\pm n}$

ในกรณีนี้ $H(j\omega) = (j\omega)^{n}$

ดังนั้น $|H|_{db} = 20\log_{10}\omega^{\pm n}$

$$= \pm 20n \log_{10} \omega \tag{2.13}$$

เนื่องจากสเกลล็อก เป็นสเกลของ ω ดังนั้นลักษณะของกราฟที่ได้จึงเป็นชุดของเส้นตรงที่ตัดแกน $\omega(|H|_{db} = 0)$ ที่ $\omega = 1$ และความชันของเส้นตรงมีค่าเท่ากับ ± 20 n db/decade (Decade หมายถึง ค่าที่เป็น 10 เท่าของ ω นั่นคือการเพิ่มของ $\log\omega$ เป็นจำนวน 1 หน่วย) ส่วนมุมของ H(s) จะมีค่าเป็น

$$\angle H = \pm n90^{\circ} \tag{2.14}$$

นั่นคือโพลและศูนย์ ที่จุดเริ่มต้นจะให้ค่าเฟสคงที่ตามฟังก์ชั่นของ W

3. โพลจริงหรือศูนย์ $(Ts+1)^{\pm n}$

ในกรณีนี้กราฟขนาดและเฟสของ H(s) จะไม่เป็นเส้นตรง กราฟของ H(s) จะหาได้จาก

$$|H|_{db} = 20\log_{10}(\sqrt{(\omega T)^2 + 1})^{n}$$

$$= \pm 20n \log_{10}(\sqrt{(\omega T)^2 + 1})$$

$$= \pm 10n \log_{10}(\sqrt{(\omega T)^2 + 1}) \tag{2.15}$$

ส่วนเฟสของ H(s) จะหาได้จาก

$$\angle \mathrm{H} = \pm n \tan^{-1} \omega \mathrm{T} \tag{2.16}$$

4. โพลสังยุคเชิงซ้อนหรือศูนย์ $(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)^{\pm n}$

ในกรณีนี้

$$|\mathrm{H}|_{db} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$$

$$= -20\log_{10}[(1 - T^2\omega^2) + 4\xi^2 T^2 \omega^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$= -10\log_{10}[(1 - T^2\omega^2) + 4\xi^2 T^2 \omega^2] \tag{2.17}$$

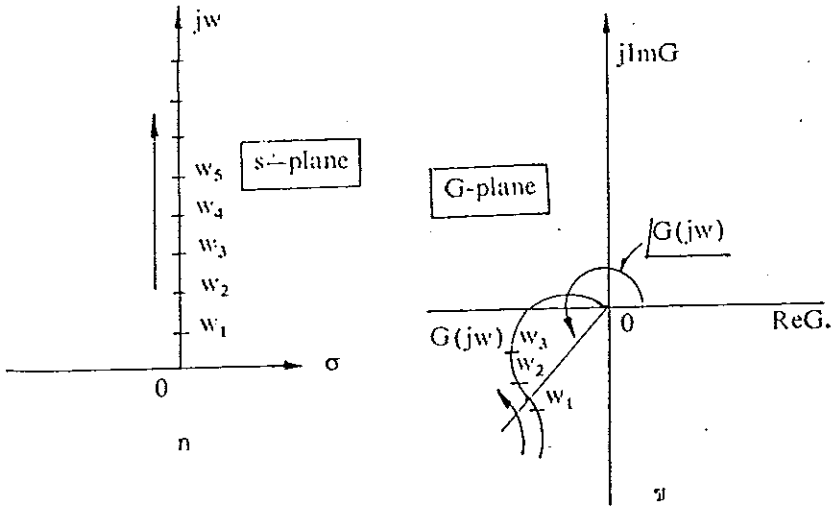
ส่วนเฟสของ H(s) จะหาได้จาก

$$\angle H = -\tan^{-1} \frac{2\xi T\omega}{1 - \omega^2 T^2} \tag{2.18}$$

กราฟโพลาร์ของฟังก์ชันถ่ายโอน G(s) เป็นการ แสดงกราฟระหว่างขนาดของ G(jw) กับ เฟสของ G(jw) นั้นบนพิกัดโพลาร์ (polar coordinates) ขณะที่ให้ w แปร ค่าจากศูนย์ถึงค่าเข้าใกล้อนันต์ ซึ่งในทางคณิตศาสตร์ หมายถึงว่า วิธีการนี้เป็นการส่งค่าของครึ่งบวก ของแกนจินตภาพ (imaginary) ในระนาบของตัวแปรเชิงซ้อน เข้าไปบนระนาบของฟังก์ชัน G(jw) ดังแสดงในภาพประกอบ 4

$$G(jw) = G(s)\Big|_{s=jw} = |G(jw)| \angle G(jw) \qquad (2.19)$$

เมื่อ $|G(jw)|$ เป็นขนาดของ G(jw) และ $\angle G(jw)$ เป็นมุม (argument) ของ G(jw)



ภาพประกอบ 4 กราฟโพลาร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนในระบบควบคุม

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (system stability analysis)

ตำแหน่งของรากของสมการคุณลักษณะ (characteristic roots) ของระบบควบคุม ป้อนกลับในกราฟความสัมพันธ์ระนาบ s จะควบคุมพฤติการณ์ของผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ และการออกแบบระบบควบคุมนี้ จะขึ้นอยู่กับปัญหาในการจัดหาตำแหน่งที่อยู่ของรากของสมการคุณลักษณะของระบบทำงานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดให้ ในระหว่างคุณสมบัติสมรรถนะ (performance specification, PS) ที่เป็นประโยชน์จำนวนมากนั้น มี PS ที่มีความต้องการและสำคัญมากอันหนึ่งคือ **"ระบบจะต้องเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลา"** ดังนั้นคำว่าเสถียรภาพอาจใช้แบ่งระบบออกเป็นสองพวก คือ "มีประโยชน์" กับ "ไม่มีประโยชน์"

ในการวิเคราะห์ระบบควบคุมเชิงเส้น เพื่อให้ทราบคุณสมบัติของระบบ ด้วยวิธีเก่าอย่างหนึ่งคือการศึกษาเรื่องเสถียรภาพ แรกที่สุดจะต้องทดสอบว่าระบบเป็นเสถียรภาพสมบูรณ์ (absolute stability) ซึ่งจะดูว่าระบบ "เสถียร" หรือ "ไม่เสถียร" ถ้าหากพบว่าระบบเสถียร จำเป็นที่จะต้องหาต่อไปอีกว่า "เสถียรภาพอย่างไร" หรือ เสถียรภาพสัมพัทธ์ อันเป็นการวัดระดับของเสถียรภาพ ดังเช่น โอเวอร์ชูต และอัตราส่วนการหน่วง เป็นเครื่องแสดงถึงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบในเชิงเวลา และเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบในเชิงความถี่ตามลำดับ

คำจำกัดความของเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นจะมีได้หลายอย่าง คำจำกัดความของเสถียรภาพที่ใช้กันแพร่หลายในระบบควบคุมอย่างเก่า แต่ยังใช้ได้ดีอยู่อย่างหนึ่งคือ

ระบบจะเรียกได้ว่าเสถียรภาพต่อเมื่อสัญญาณออก เป็นค่าขอบเขต (bounded) สำหรับค่าขอบเขตสัญญาณเข้าใด ๆ หรืออีกนัยหนึ่งให้ r(t) เป็นสัญญาณเข้า และ c(t) เป็นสัญญาณออกของระบบเชิงเส้น ดังนั้นถ้า

$$| r(t) | \geq N < \infty \qquad \text{สำหรับ} \quad t \leq t_0 \tag{2.20}$$

$$| c(t) | \leq M < \infty \qquad \text{สำหรับ} \quad t \geq t_0 \tag{2.21}$$

จะเรียกได้ว่าระบบเข้าเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นอยู่บ้าง คือ วงจรหาอนุพันธ์ (differentiator) จะให้ผลตอบสนองคลื่นดล ที่ $t = t_0$ เมื่อป้อนด้วยสัญญาณเข้าหนึ่งหน่วย $u(t-t_0)$ ในกรณีนี้สัญญาณเข้าจะเป็นค่าขอบเขต แต่สัญญาณออกไม่เป็นเนื่องจากว่าคลื่นดลจะมีขนาดเป็นค่าเข้าใกล้อนันต์ และ เมื่อป้อน $u(t-t_0)$ เข้ากับตัวอินทิเกรต (integrator) จะได้สัญญาณออกเป็นฟังก์ชัน ramp $(t-t_0)u(t-t_0)$ ซึ่งไม่เป็นค่าขอบเขต สำหรับ $t>t_0$ แต่เนื่องด้วยวงจรหาอนุพันธ์ และตัวอินทิเกรต เป็นระบบที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นจึงได้จำกัดความว่าทั้งสองระบบเสถียรภาพ

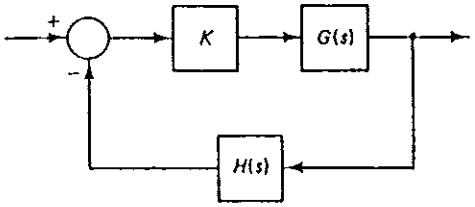
เสถียรภาพของระบบจะดูได้ง่ายจากกราฟทางเดินของราก ทั้งนี้เพราะเป็นทางเดินของ s ซึ่งเป็นศูนย์ของสมการลักษณะเฉพาะ เมื่อมีทางเดินอยู่ทางครึ่งขวาของระนาบ s จะแสดงว่า eigenvalue จะมีส่วนจริง (real part) เป็นบวก ซึ่งเป็นกรณีของอเสถียรภาพและกลับกันถ้ามีทางเดินอยู่ทางด้านครึ่งซ้ายของระนาบ s เท่านั้น จะเป็นกรณีของเสถียรภาพ

การใช้กราฟทางเดินของราก ในการวิเคราะห์นั้นเป็นการหารากของสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบ จำลองของระบบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรบางตัวของสมการ จากนั้นดูรากของสมการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร สมการคณิตศาสตร์แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เรียกว่าสมการลักษณะเฉพาะของระบบ (system characteristic equation) รากของสมการที่ต้องหาในแต่ละครั้งนั้นคือการหารากหรือโพลของฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงรอบปิด (the close-loop transfer function) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรากของสมการ คือการนำรากที่หาได้ไปพล็อตให้เป็นลักษณะกราฟ ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบ ซึ่งกราฟที่ได้เรียกว่าทางเดินของราก

รูปแบบของสมการระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงได้ดังนี้

$$1 + F(s) = 0 \qquad (2.22)$$

F(s) เป็นฟังก์ชันวงรอบเปิดซึ่งเขียนเป็นแผนภาพกล่องได้แสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แผนภาพกล่องของระบบควบคุม

โดยที่ $F(s) = KG(s)H(s)$ จะได้สมการระบบคือ

$$1 + KG(s)H(s) = 0 \qquad (2.23)$$

ในการวิเคราะห์ระบบดังตัวอย่างข้างบนนี้ เป็นการหาทางเดินของรากเมื่อมีการกำหนดค่า K ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง ∞ ($0 \le K < \infty$) นอกจากนี้ยังสมมติฐานเงื่อนไขว่า ให้ G(s) เป็น ฟังก์ชั่นถ่ายโอนรวมของฟังก์ชันถ่ายโอนตัวชดเชย (compensator transfer function) $G_c(s)$ และฟังก์ชันถ่ายโอนโรงจักร (plant transfer function) $G_p(s)$ และในการวิเคราะห์ค่า K ต้องเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบเชิงเส้นด้วย

สมมติว่า s_1 เป็นรากของสมการที่ (2.23) เมื่อ K เป็นค่าจำนวนจริงและอยู่ในช่วง $0 \le K < \infty$ ทำให้เขียนสมการ (2.23) ใหม่ได้ว่า

$$K = \frac{-1}{G(s)H(s)} \qquad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) พบว่า s เป็นจุดที่อยู่บนทางเดินของราก ทำให้ผลลัพธ์ทางด้านขวามือของสมการ (2.24) เป็นจำนวนจริงบวกเหมือนกับ ค่า K

โดยทั่วไป G(s) และ H(s) มีลักษณะเป็นจำนวนจินตภาพที่ค่า s ต่างๆ ดังนั้นจึงสามารถแยกสมการที่ 3 ออกได้เป็นอีกสองสมการ ซึ่งแสดงได้ดังนี้คือ

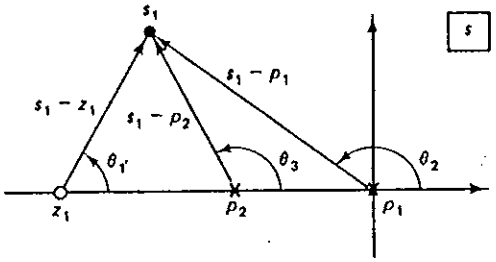
$$|K| = \frac{1}{|G(s)H(s)|} \tag{2.25}$$

และ $$\angle G(s).H(s) = \gamma(180^\circ) \qquad \gamma = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \ldots \tag{2.26}$$

สมการ (2.25) เรียกว่าเกณฑ์ขนาด (manitude criterion)

สมการ (2.26) เรียกว่าเกณฑ์มุม (angle criterion) โดยที่

$$KG(s)H(s) = \frac{K(s - z_1)}{(s - p_1)(s - p_2)} \tag{2.27}$$



ภาพประกอบ 6 รูปแสดงลักษณะของเกณฑ์มุม

s_1 เป็นจุดที่อยู่บนเส้นทางเดินของรากและ มุมของ $(s-z_1)$, $(s-p_1)$ และ $(s-p_2)$ คือ θ_1, θ_2 และ θ_3 ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 = \pm 180^0 \tag{2.28}$$

พบว่าจุดใดๆ บนทางเดินของรากต้องเป็นไปตามสมการที่ (2.28) เสมอ

บทที่ 3

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

เนื่องจากการวิเคราะห์ระบบควบคุมคือการสำรวจตรวจสอบระบบที่กำหนดให้ ซึ่งรู้ค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบของระบบอย่างครบถ้วน สามารถศึกษาถึงคุณสมบัติและการทำงานภายใต้ภาวะต่าง ๆ โดยการแทน หรือจำลองปัญหาด้วยรูปแบบในลักษณะต่าง ๆ เพื่อที่จะได้เข้าถึงหรือมองปัญหาออก ซึ่งจะช่วยให้วิเคราะห์ ออกแบบ และหาคุณค่าของปัญหาเหล่านั้นได้ โดยสามารถจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้แทนด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ , สมการสถานะ (state equations), ฟังก์ชันถ่ายโอน, การนิรูปเมตริกซ์ (matrix representation) เป็นต้น หรือการใช้แบบจำลองกราฟโดยใช้แทนด้วยแผนภาพกล่อง

ในงานออกแบบระบบควบคุมนั้น หลังจากที่มีการจำลองระบบควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แล้วสามารถศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผลตอบสนองต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเวลา หรือในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ขึ้นอยู่กับระบบนั้น ๆ ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์ระบบก็คือการวิเคราะห์ สมการนั่นเอง ในที่นี้จะทำการนำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากสมการมาแสดงโดยวิธีกราฟ 4 ลักษณะคือ กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา, กราฟโบเด, กราฟโพลาร์ และ กราฟทางเดินของราก

การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวในแต่ละครั้งโดยใช้มือนั้น ต้องใช้เวลานาน ยุ่งยาก และเป็น งานที่ต้องทำซ้ำไปซ้ำมาหลาย ๆ ครั้ง ทำให้เสียเวลา เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จึงได้มีการนำเอา ลักษณะของการวิเคราะห์ทั้ง 4 แบบ มาจัดทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมแสดงผลของกราฟทั้ง 4 แบบ เพื่อให้สามารถแสดงผลของกราฟทางจอภาพพร้อมกันทั้ง 4 ในเวลาเดียวกัน หรือแสดงผลเพียงส่วนเดียว โดยให้ผู้ใช้สามารถปรับช่วงทั้งแกนดิ่งและแกนราบได้ ซอฟท์แวร์ที่เลือกใช้ในการพัฒนาโปรแกรมจะต้องรองรับการทำงานลักษณะ ดังกล่าว

จากการศึกษาซอฟท์แวร์ที่มีในท้องตลาดปัจจุบัน ผลสุดท้ายได้ทำการเลือกซอฟท์แวร์ ที่มีชื่อว่า ไมโครซอฟท์วิชวลเบสิก 3.0 ใช้งานบน Windows เป็นลักษณะของการพัฒนาโปรแกรมวิชวล (visual) คือโปรแกรมแบบใหม่ที่ใช้ ภาพ และคำภาษาอังกฤษอย่างง่าย ๆ มาเรียบเรียงเขียนเป็นโปรแกรมด้วยไวยากรณ์ง่าย ๆ อันหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีการใช้ "ภาพหรืออักษรภาพ" ซึ่งอาจเป็นไอคอนหรือรูปภาพต่าง ๆ

โดยไอคอนหรือรูปภาพเหล่านี้ จะสื่อว่าเป็นชุดคำสั่งโปรแกรมเพื่อทำอะไรสักอย่าง ซึ่งชุดโปรแกรมหรือไลบรารี (library) เหล่านี้จะมีการใช้เทคนิคของ OOP (Object Oriented Programming) เข้าร่วมด้วย

การพัฒนาโปรแกรมอาจใช้ภาษาวิชวลนี้สร้างโปรแกรมหนึ่ง ๆ แล้วทำการเก็บเอาไว้ในรูปแบบของไอคอนหรือชื่อไลบรารีหนึ่ง ๆ เพื่อง่ายต่อการจดจำและง่ายต่อการที่ผู้อื่นจะหยิบยืมไปขอใช้ก็ได้ หากผู้ใช้ที่รู้ภาษาซีหรือปาสคาล ก็สามารถใช้ภาษาอังกฤษง่าย ๆ เหล่านี้เขียนจำลองภาษาซีหรือปาสคาลนั้นขึ้นมาใช้เองก็ได้ ด้วยคุณลักษณะเหล่านี้ มีคนให้นิยามว่าภาษานี้จะมีลักษณะเสมือนเป็นกิ้งก่าหรือจิ้งจกที่สามารถแปรเปลี่ยนสีผิวตามสภาพที่ต้องการได้

อย่างไรก็ตาม แนวคิดการสร้างภาษานี้ ไม่ต้องการให้ผู้ใช้สร้างวัตถุ (object) เอง ผู้สร้างภาษาวิชวลนี้มีการออกแบบวัตถุ พื้นฐานต่าง ๆ ที่เป็นชุดโปรแกรมเอาไว้มากมายก่อนแล้ว สิ่งที่ผู้เขียนโปรแกรมทั่วไปหรือผู้ใช้คอมพิวเตอร์ควรกระทำก็คือเรียนรู้ว่าวัตถุแต่ละตัวทำหน้าที่อะไรบ้าง จากนั้นก็นำเอาวัตถุต่าง ๆ เหล่านี้มาต่อเข้าด้วยกัน แล้วตกแต่งให้งดงามตามใจชอบในรายละเอียด และนั่นคือวิธีการสร้างเขียนโปรแกรมแบบใหม่

วิชวลเบสิก 3.0 เป็นเครื่องมือที่ช่วยพัฒนาโปรแกรมบน windows ได้ง่ายและสะดวก มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมาก เนื่องจากมี Custom Control, DLL และสามารถใช้งาน window API ได้โดยตรงจากรหัสโปรแกรมของวิชวลเบสิก ซึ่งทำให้สามารถสร้างโปรแกรมประยุกต์ ใหม่ ๆ ได้หลากหลายมาก

ในการเริ่มต้นการใช้วิชวลเบสิก 3.0 ก็กดปุ่มเมาส์ 2 ครั้ง ที่ไอคอน วิชวลเบสิก 3.0 เพื่อเข้าสู่วิชวลเบสิก ซึ่งจะปรากฏหน้าตาของโปรแกรมที่มีส่วนประกอบดังนี้

Microsoft Visual Basic เป็นส่วนบุคคลซึ่งจะมี Menu Bar และ Tool Bar

Toolbox เป็นส่วนที่เลือกวัตถุ หรือตัวควบคุมต่าง ๆ มาแปะลงบน Form ซึ่ง สามารถทำได้โดยการเลือกที่วัตถุนั้น

Form เป็นส่วนที่เอาไว้สร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งในโปรแกรมหนึ่งสามารถมีได้หลาย ๆ Form

Project Window เป็นหน้าต่างที่แสดงรายชื่อของไฟล์ที่เป็นส่วนประกอบของโปรแกรมประยุกต์ที่สร้าง

Properties Window เป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุที่อยู่บน Form ซึ่งสามารถที่จะแก้ไขได้

นอกจากนั้นยังสามารถศึกษาวิธีการสร้างโปรแกรมประยุกต์อย่างคร่าว ๆ ได้ ซึ่งทำให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายโดยเลือกหัวข้อ Help ที่คำสั่ง Learning Microsoft Visual Basic ในหัวข้อต่าง ๆ ได้ดีพอสมควร หลักการของวิชวลเบสิกยังคงความง่ายและไม่ซับซ้อนตามแบบฉบับของเบสิก ซึ่งตรงจุดนี้เองที่ได้รับความนิยมสูง ในการเขียนโปรแกรมแบบเดิมค่อนข้างจะยุ่งยาก และเสียเวลามาก ตัวอย่างเช่น

ถ้าต้องการออกแบบจอภาพในส่วนติดต่อกับผู้ใช้สักหนึ่งภาพอาจต้องใช้เวลากันเป็นวัน ๆ เพราะต้องมานั่งระบุตำแหน่งการแสดงผล และคิดขั้นตอนการทำงาน จากนั้นก็เขียนโปรแกรม โปรแกรมที่ได้จะอธิบายและสั่งงานคอมพิวเตอร์เป็นลำดับ แต่ในวิชวลเบสิกจะใช้หลักการของภาพและการมองเห็น ซึ่งขั้นตอนแรกจะต้องออกแบบหน้าต่างก่อน หรือที่เรียกว่า Form โดยที่ไม่ต้องเขียนโปรแกรมจัดการใด ๆ ใน Form จะประกอบไปด้วยวัตถุ หรือตัวควบคุมต่าง ๆ ที่จะทำงาน

ในการเลือกวัตถุมาทำงาน ทำได้โดยเลือกจาก Toolbox เมื่อได้วัตถุที่ต้องการแล้วสามารถที่จะทำการกำหนดคุณสมบัติ (properties) ของวัตถุนั้น ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่ง, ชื่อ, ตัวพิมพ์, ขนาด หรือสี ของวัตถุ เสร็จแล้ว เมื่อสนใจเหตุการณ์ใดก็เขียนโปรแกรมควบคุมเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับวัตถุนั้น ๆ

การเขียนโปรแกรมควบคุมวัตถุทำได้ง่าย คือเลือกวัตถุที่สร้างขึ้นมา จะเห็นได้ว่าวิธีการแบบนี้มีลักษณะที่เป็นธรรมชาติมากกว่าการเขียนโปรแกรมแบบอื่น คือ กำหนดหน้าตาของจอภาพหรือส่วนติดต่อกับผู้ใช้ และระบุว่าเหตุการณ์อย่างนี้กับสิ่งนี้จะต้องทำอย่างไร ซึ่งการเขียน โปรแกรมจะเป็นการสั่งให้วัตถุนั้นทำงาน ถ้าจะสรุปก็จะได้หลักการง่าย ๆ ในการสร้างโปรแกรมประยุกต์ด้วยวิชวลเบสิก ที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. สร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้
2. กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุที่อยู่บน Form
3. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับวัตถุนั้น ๆ

สำหรับรหัสต้นฉบับของโปรแกรมจะเกี่ยวข้องกับไฟล์อยู่ 4 กลุ่มคือ

.MAK เก็บรายละเอียดของโปรแกรมประยุกต์ว่าจะประกอบด้วยไฟล์ใดบ้าง

.FRM เก็บรายละเอียดของ Form ที่ออกแบบไว้

.BAS เก็บโปรแกรมต้นฉบับ

.VBX เป็นแฟ้มข้อมูลไลบรารีที่มีการควบคุมต่าง ๆ ให้ผู้ใช้เลือก

การออกแบบโปรแกรม

รูปแบบฟังก์ชันของระบบตามมาตรฐานของแผนภาพกล่อง ในระบบควบคุม ดังภาพประกอบ 5 โดยที่ H(s) เป็นตัวตรวจจับ (sensor) และ D(s) เป็นตัวชดเชย (compensator) มีอันดับไม่เกิน 2 และเป็นวงรอบปิด

$$\text{ระบบป้อนกลับ } H(s) = \frac{m_2 s + m_1 s + m_0}{n_2 s + n_1 s + n_0} = \frac{M}{N} \qquad (3.1)$$

CENTRAL LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

ตัวปรับระบบ $D(s) = \frac{x_2 s + x_1 s + x_0}{y_2 s + y_1 s + y_0} = \frac{X}{Y}$ (3.2)

K เป็นค่าอัตราขยายคงที่

G(s) เป็นตัวถูกควบคุมมีอันดับไม่เกิน 9

ระบบหลัก $G(s) = \frac{a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots a_1 s + a_0}{b_9 s^9 + b_8 s^8 + \ldots b_1 s + b_0} = \frac{A}{B}$ (3.3)

เมื่อมีการบันทึกสมการระบบ H(s), D(s), K, G(s) แล้วคำนวณตามหลักคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมเป็น T(s)

โดยที่ $T(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

$= \frac{D(s)KG(s)}{1 + D(s)KG(s)H(s)}$ ในรูปของ H(s), D(s), K, G(s)

$= \frac{KXA}{YB + KH(s)XA}$ โดยแทนค่า $H(s) = \frac{M}{N}, D(s) = \frac{X}{Y}, G(s) = \frac{A}{B}$

$= \frac{KXAN}{YBN + KXAM}$ (3.4)

กรณีวงรอบเปิด คือ $M = 0$ จะได้ $T(s) = \frac{KXA}{YB}$

เมื่อเขียนในรูปของ s กรณีวงรอบปิด จะได้

$$T(s) = \frac{K(x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots + a_1 s + a_0)(n_2 s^2 + n_1 s + n_0)}{(y_2 s^2 + y_1 s + y_0)(b_9 s^9 + b_8 s^8 + \ldots + b_1 s + b_0)(n_2 s^2 + n_1 s + n_0) + K(x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots + a_1 s + a_0)} \quad (3.5)$$

และ กรณีวงรอบเปิด จะได้

$$T(s) = \frac{K(x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots a_1 s + a_0)}{(y_2 s^2 + y_1 s + y_0)(b_9 s^9 + b_8 s^8 + \ldots b_1 s + b_0)} \quad (3.6)$$

1. รูปแบบของการบันทึกฟังก์ชันถ่ายโอน

จากรูปแบบสมการที่ใช้ในการบันทึกฟังก์ชันถ่ายโอน ของระบบในสมการที่ (3.6) จะเป็นแบบ พหุนาม เนื่องจากการบันทึกสมการของ D(s), G(s), H(s) สามารถรองรับทั้งแบบพหุนาม และตัวประกอบได้ ฉะนั้นในหลักการของคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเป็นหัวใจสำคัญ คือ

1.1 การแปลงสมการจากรูปแบบตัวประกอบเป็นพหุนาม โดยใช้หลักการคูณแบบพีชคณิต ดังนี้ โดยคำนวณแบ่งฟังก์ชันถ่ายโอน เป็นพจน์เก็บเข้าแถวลำดับ (array) แล้วใช้รูปแบบการคูณของแต่ละสมาชิกของแถวลำดับ เช่น $x_0(x_1+x_2+x_3)(x_4+x_5+x_6)$

กำหนดให้มีแถวลำดับ $A[8,3]$

จะได้ว่า $A[1,1]=x_1$

$A[1,2]=x_2$

$A[1,3]=x_3$

$A[2,1]=x_4$

$A[2,2]=x_5$

$A[2,3]=x_6$

กำหนด $B[?]$

$B[1]=A[1,1]*A[2,1]=x_1*x_4$

$B[2]=A[1,1]*A[2,2]=x_1*x_5$

$B[3]=\ldots$

สุดท้ายหาผลรวมของทุกพจน์ ($B[?]$) ที่มียกกำลังเท่ากัน แล้วคูณด้วย x_0

1.2 การแปลงสมการจากรูปแบบพหุนามเป็นตัวประกอบ โดยใช้หลักการถอดรากตามวิธีของแบร์สโตว (Bairstow) เนื่องจากสมการระบบเป็นรูปแบบของสมการพหุนาม ดังนั้น รากของสมการก็คือการให้สูตรคำนวณหารากของสมการพหุนาม ซึ่งในโปรแกรมจะใช้วิธีการของแบร์สโตว ซึ่งมีขั้นตอนวิธี (algorithm) ดังนี้คือ จากสมการพหุนามใด ๆ ทำการแยกสมการออกมาให้เป็นสมการพหุนามกำลังสอง หรือเรียกว่า ตัวประกอบกำลังสอง (quadratic factor) แล้วหาค่าขั้นตอนวิธีการแบร์สโตว ในการเขียนโปรแกรม

จุดประสงค์ : ต้องการหาสมการ $q(x)=x^2-rx-s$ จากอันดับพหุนาม n ใด ๆ

$$p(x) = a_1 x^n + \ldots + a_n x + a_{n+1} \quad (a_1 \neq 0) \tag{3.7}$$

{initialnize}

Get $n, a_1, a_2, a, \ldots, a_{n+1}$ {parameters of p(x)}

MaxIt,NumSig {termination parameter}

r_o, s_o {initial quesss of r,s}

$b_1 \leftarrow a_1; c_1 \leftarrow b_1; r \leftarrow r_o; s \leftarrow s_o; Tol \leftarrow 10^{-numsig}$

{Iterate}

DO FOR k=1 To MaxIt UNTIL termination test is satisfided

BEGIN {get remaining b's and c's by quadratic synthetic division}

$b_2 \leftarrow a_2 + b_1 r \; ; \; c_2 \leftarrow b_2 + c_1 r$

DO FOR i = 3 TO n+1

BEGIN

$b_i \leftarrow a_i + r b_{i-1} + s b_{i-2}$

$c_i \leftarrow b_i + r c_{i-1} + s c_{i-2}$

END

{solve}

$Det \leftarrow c_n c_{n-2} - c^2{}_{n-1}$

$dr \leftarrow (b_n c_{n-1} - b_{n+1} c_{n-2}) / Det$

$ds \leftarrow (b_{n+1} c_{n-1} - b_n c_n) / Det$

$r \leftarrow r + dr; s \leftarrow s + ds$

OUTPUT (r,dr,s,ds)

{termination test : $|dr| \leq Tol * \max(1,|r|) and |ds| \leq Tol * \max(1,|s|)$}

END

IF termination test succeeded {เช่น $(|\rho_r| or |\varepsilon_r| \leq Tol) and (|\rho_s| or |\varepsilon_s| \leq Tol)$}

THEN OUTPUT $(q(x) = x^2 - rx - s$ is a factor of p(x) and

$$Q(x) = b_1 x^{n-1} + \ldots + b_{n-2} x + b_{n-1}$$ is p(x)/q(x)

{In this case the p(x)←q(x) step of Quadratic Deflation is simply}

{DO FOR i = 2 TO n-1 $a_i \leftarrow b_i$}

ELSE OUTPUT (Convergence is not apparent in MaxIt iterations)

เนื่องจากการหารากสมการมีการสุ่มหาค่าในการคำนวน เพื่อให้เจอค่ารากชุดแรก จะให้วิธีการกำหนดเงื่อนไขการหาค่ารากเริ่มแรกดังนี้คือ

กรณีรากมีขนาดใหญ่ $r_o = \frac{-a_2}{a_1}$ และ $s_o = \frac{-a_3}{a_1}$

กรณีรากขนาดเล็ก (ถ้า $a_{n-1} \neq 0$), $r_o = \frac{-a_n}{a_{n-1}}$ และ $s_o = \frac{-a_{n+1}}{a_{n-1}}$

ตัวอย่างเช่น

$$P(x) = x^5 - 4.5x^4 + 4.5x^3 + 2.675x^2 - 3.3x - 1.4375 \quad (3.8)$$

$$r_o = -\frac{-3.3}{2.675} = 1.233645$$

และ $$s_o = -\frac{-1.4375}{2.675} = 0.5373832$$

ซึ่งจะได้สมการระบบ T(s) 2 รูปแบบ

1) สมการระบบแบบพหุนาม

$$T(s) = \frac{x_9 s^9 + x_8 s^8 + \ldots + x_1 s + x_0}{y_9 s^9 + y_8 s^8 + \ldots + y_1 s + y_0}$$ มีอันดับได้ไม่เกิน 9 (3.9)

2) สมการระบบรูปแบบตัวประกอบ

$$T(s) = \frac{(a_{11}s + a_{12} + a_{13}j)(a_{21}s + a_{22} + a_{23}j)\ldots(a_{91}s + a_{92} + a_{93}j)}{(b_{11}s + b_{12} + b_{13}j)(b_{21}s + b_{22} + b_{23}j)\ldots(b_{91}s + b_{92} + b_{93}j)} \quad (3.10)$$

มีจำนวนวงเล็บไม่เกิน 9

2. รูปแบบฐานข้อมูล

เพื่อให้สามารถใช้สมการที่เคยบันทึกไว้กลับมาใช้อีก จำเป็นต้องเก็บไว้ในฐานข้อมูล 2 รูปแบบ

2.1 รูปแบบพหุนามมีฟังก์ชันถ่ายโอน T(s) ดังนี้

$$T(s) = \frac{x_9 s^9 + x_8 s^8 + x_7 s^7 + \ldots + x_1 s + x_0}{y_9 s^9 + y_8 s^8 + y_7 s^7 + \ldots + y_1 s + y_0}$$

เก็บไว้ในฐานข้อมูล Microsoft Access ชื่อ MERGFRM.MDB มีโครงสร้างดังนี้คือ FORMULARPLY เป็น พื้นภูมิ (field)ชนิดข้อความ (TEXT) ขนาด 50 ตัวอักษร เก็บชื่อสมการแบบพหุนาม

X9,X8,X7,...,X1,X0 เป็นพื้นภูมิชนิด CURRENCY เก็บสัมประสิทธิ์ของเศษ

Y9,Y8,Y7,...,Y1,Y0 เป็นพื้นภูมิชนิด CURRENCY เก็บสัมประสิทธิ์ของส่วน

โดยที่ $Xn = x_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของ s^n $(n = 9,8,7,\ldots,1,0)$

2.2 รูปแบบตัวประกอบมีฟังก์ชันถ่ายโอน T(s) ดังนี้

$$T(s) = \frac{a_0(a_{11}s + a_{12} + a_{13}j)(a_{21}s + a_{22} + a_{23}j)\ldots(a_{91}s + a_{92} + a_{93}j)}{b_0(b_{11}s + b_{12} + b_{13}j)(b_{21}s + b_{22} + b_{23}j)\ldots(b_{91}s + b_{92} + b_{93}j)}$$

เก็บไว้ในฐานข้อมูล Microsoft Access เดียวกันชื่อ MERGFRM.MDB แต่ไม่ได้อยู่ในระเบียน (record) เดียวกันมีโครงสร้างดังนี้

FORMULA เป็นพื้นภูมิชนิดข้อมูลขนาด 50 ตัวอักษร เก็บชื่อฟังก์ชันถ่ายโอน แบบตัวประกอบ

AO, Amn $(m = 1,2,\ldots,9; n = 1,2,3)$ เป็นสัมประสิทธิ์ของเศษ

BO, Bmn $(m = 1,2,\ldots,9; n = 1,2,3)$ เป็นสัมประสิทธิ์ของส่วน

โดยที่ $AO = a_o$; $Amn = a_{mn}$ $(m = 1,2,\ldots,9; n = 1,2,3)$

$BO = b_o$; $Bmn = b_{mn}$ $(m = 1,2,\ldots,9; n = 1,2,3)$

นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างเพิ่มเติมคือ ORDERGET, FORMULARTYPE ซึ่ง ORDERGET เป็นพื้นภูมิชนิดข้อความขนาด 1 ตัวอักษร ใช้ในการเก็บเงื่อนไขของจำนวนอันดับ เพื่อความสะดวกในการค้นจากฟังก์ชันถ่ายโอนของ D(s), G(s), H(s) ที่เคยบันทึกไว้แล้ว เนื่องจากมีการกำหนดข้อจำกัดของอันดับ ไว้ดังนี้

ถ้า ORDERGET = 2 หมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนในระเบียนนั้นมีอันดับ≤2

ถ้า ORDERGET = 9 หมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนในระเบียนนั้นมี 2<อันดับ≤ 9

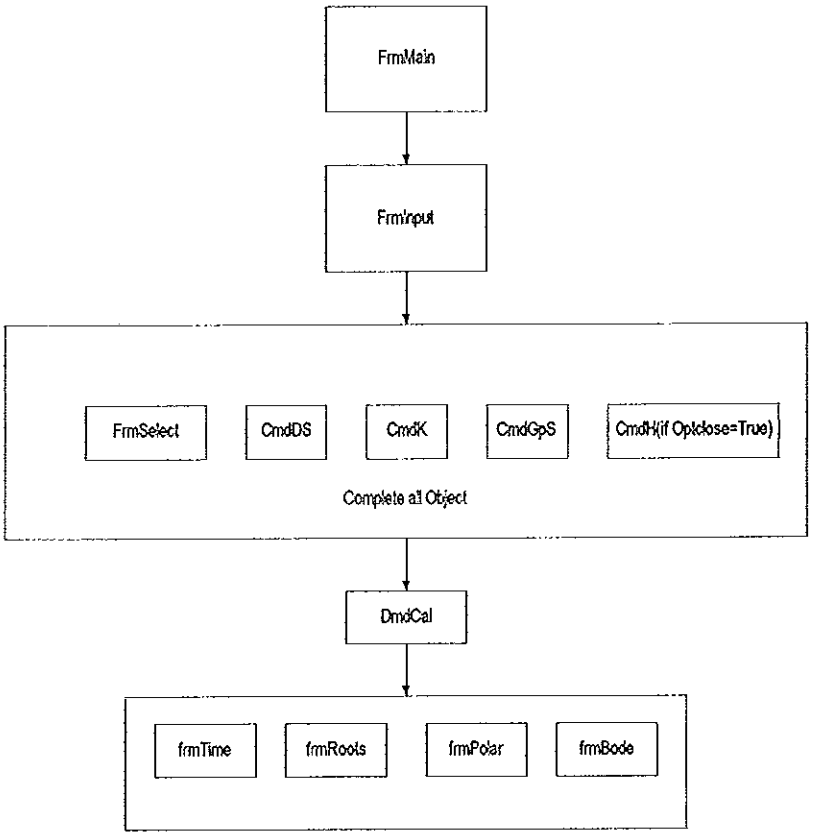
และ FORMULARTYPE เป็นพื้นภูมิชนิดข้อความขนาด 1 ตัวอักษร ใช้ในการเก็บรูปแบบของสมการ

ถ้า FORMULARTYPE = F หมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนแบบตัวประกอบ

FORMULARTYPE = P หมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนแบบพหุนาม

3. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมบันทึก

ส่วนของการบันทึกหรือเลือกสมการระบบมีสายงาน (flow) การทำงานแบบวัตถุ ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก

3.1 **FrmMain** เป็น Form หลักของโปรแกรมทั้งหมด

3.2 **FrmInput** เป็น Form เตรียมฟังก์ชันถ่ายโอนระบบของแผนภาพกล่อง

3.3 **FmeSelect** เป็น Flame ที่ใช้ในการเลือกรูปแบบของระบบว่าเป็นระบบเปิดหรือระบบปิด เก็บไว้ใน Property คือ

$$\left.\begin{array}{l} fmeSelect.optOpen.value = True \\ fmeSelect.optClose.value = False \end{array}\right\} \text{เป็นรูปแบบระบบเปิด}$$

$$\left.\begin{array}{l} fmeSelect.optOpen.value = False \\ fmeSelect.optClose.value = False \end{array}\right\} \text{เป็นรูปแบบระบบปิด}$$

3.4 **CmdK** เป็นวัตถุที่ใช้ในการจัดการค่าคงที่ K ของระบบ

CmdDS เป็นวัตถุที่ใช้ในการจัดการสมการของ D(s)

CmdGpS เป็นวัตถุที่ใช้ในการจัดการสมการของ G(s)

CmdH เป็นวัตถุที่ใช้ในการจัดการสมการของ H(s)

เมื่อมีการเลือก D(s) จะได้ Dsclick = True จะไปเลือก FrmInputFmr

G(s) จะได้ GPSclick = True จะไปเลือก FrmInputFmr

H(s) จะได้ Hclick = True จะไปเลือก FrmInputFmr

โดยที่ FrmInputFmr เป็น Form ที่จัดการเกี่ยวกับสมการต่าง ๆ สามารถเลือกสมการแบบตัวประกอบ หรือพหุนามก็ได้

ถ้าเลือกแบบตัวประกอบจะทำงานที่ fmeFactor หลังจากเลือกสมการเรียบร้อยแล้วจะเก็บไว้ที่ตัวแปรคือ

DSVal_A(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของเศษ	D(s)
DSVal_B(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของส่วน	D(s)
GpSVal_A(9,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของเศษ	G(s)
GpSVal_A(9,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของส่วน	G(s)
HVal_A(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของเศษ	H(s)
HVal_A(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบของส่วน	H(s)

ถ้าเลือกแบบพหุนามจะทำงานที่ fmePoly หลังจากเลือกสมการเรียบร้อยแล้วจะเก็บไว้ที่ตัวแปร

DSValPoly_A(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของเศษ	D(s)
DSValPoly_B(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของส่วน	D(s)
GpSValPoly_A(9,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของเศษ	G(s)
GpSValPoly_B(9,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของส่วน	G(s)
HValPoly_A(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของเศษ	H(s)
HValPoly_B(2,3)	เก็บค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของส่วน	H(s)

3.5 **CmdCal** เป็นวัตถุที่ทำการรวบรวมสมการ D(s), K, G(s) กรณีวงรอบเปิดและ D(s), K, G(s), H(s) กรณีวงรอบปิด โดยใช้วิธีแบบตัวคูณพีชคณิตและการแยกตัวประกอบแบบแบร์สโตว เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมของทั้งระบบเก็บไว้ในตัวแปรโดยที่

S_A(0 to 11) เป็นเศษ, S_B(0 to 11) เป็นส่วน เก็บสมการแบบพหุนาม

OkplusFT_A(0 to 11) เป็นเศษ, OkplusFT_B(0 to 11) เป็นส่วน เก็บสมการแบบตัวประกอบ

3.6 **frmTime** จัดการเกี่ยวกับกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

frmRoots จัดการเกี่ยวกับกราฟทางเดินของราก

frmPolar จัดการเกี่ยวกับกราฟโพลาร์

frmBode จัดการเกี่ยวกับกราฟโบเด

จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

การพัฒนาโปรแกรมกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

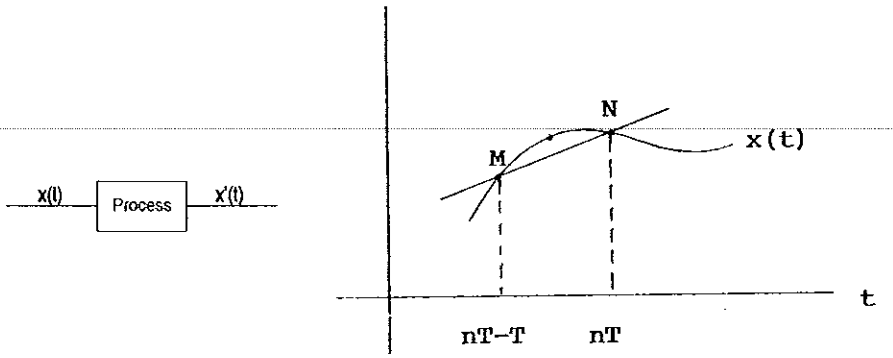
การวิเคราะห์แบบผลตอบสนองเชิงเวลานั้น จะเป็นการวิเคราะห์ระบบที่มีแบบจำลองโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \ldots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \ldots + b_0 x(t) \qquad (3.11)$$

จุดประสงค์ของการวาดกราฟของผลตอบสนองเชิงเวลา คือ การแสดงค่าของสัญญาณออกที่เวลาต่าง ๆ กันซึ่งในการคำนวนด้วยคอมพิวเตอร์ ก็คือการใช้คอมพิวเตอร์คำนวนผลลัพท์ของสมการที่เวลาใด ๆ ซึ่งในที่นี้จะใช้หลักการของการหาอนุพันธ์เชิงตัวเลข (numerical differentiation) ในการคำนวน

1. หลักการของการหาอนุพันธ์เชิงตัวเลข

ถ้าระบบเชิงอุปมานเป็นวงจรหาอนุพันธ์เราไม่สามารถจะหา เครื่องจำลองหาตัวเลข (digital simulator) โดยการใช้วิธีของการสุ่มตามเวลาได้เนื่องจากผลตอบสนองคลื่นดลของระบบไม่ราบรื่น การหาเครื่องจำลองเชิงตัวเลข ของระบบที่เป็นวงจรหาอนุพันธ์ จึงต้องหาจากวิธีการประมาณ



ภาพประกอบ 8 แสดงการหาความชันของสัญญาณที่เวลาใด ๆ

เนื่องจากวงจรหาอนุพันธ์ คือ การหาความชันของสัญญาณที่เวลาใด ๆ ดังนั้นจะหาความชันของสัญญาณ $x(t)$ ระหว่างเวลา $nT-T$ กับ nT ได้จาก

$$y_1[n]=\frac{x(nT)-x(nT-T)}{T} \tag{3.12}$$

สามารถประมาณความชันของเส้นตรง MN ว่าเป็นค่าเฉลี่ยของความชันที่เวลา $nT-T$ และ T ดังนั้น

$$\frac{y_2[n]+y_2[n-1]}{2}=\frac{x(nT)-x(nT-T)}{T} \tag{3.13}$$

หรือ $$y_1[n]=\frac{y_2[n]+y_2[n-1]}{2} \tag{3.14}$$

เมื่อ $y_1[n]$ คือ ความชันของเส้นตรง MN

$y_2[nT]$ คือ ความชันที่เวลา nT

$y_2[nT-T]$ คือ ความชันที่เวลา $nT-T$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.13) สามารถหาความชันของสัญญาณที่เวลาใด ๆ ได้จากสมการที่ (3.15)

ได้สมการทั่วไปคือ $$y[nT]=\frac{2}{T}(x[nT]-x[nT-T])-y(n-1) \tag{3.15}$$

หรือถ้ามองในโดเมนแซด (z-domain) จะได้ว่าฟังก์ชันระบบของวงจรหาอนุพันธ์ คือ

$$s=D(z)=\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

เนื่องจากสมการทั่วไปของฟังก์ชันระบบในระบบเชิงอุปมาน คือ

$$H(s)=\frac{b_m s^m+\ldots+b_1 s+b_0}{a_m s^m+\ldots+a_1 s+a_0} \tag{3.16}$$

และเนื่องจาก s ในโดเมนความถี่ คือฟังก์ชันระบบของวงจรหาอนุพันธ์ ถ้าแทนค่า s จากสมการ (3.16) ด้วย $D(z)$ ในสมการที่ (3.15) จะได้ว่า

$$H(z)=\frac{b_m D^m(z)+\ldots+b_1 D(z)+b_0}{a_m D^m(z)+\ldots+a_1 D(z)+a_0} \tag{3.17}$$

จากสมการที่ (3.14-3.16) สามารถหาสัญญาณออกของระบบที่รู้ฟังก์ชันระบบ $H(s)$ ในสมการที่ (3.16) ระบบที่มีอันดับ = 0 จะได้

$$\frac{y(s)}{x(s)} = H(s) = \frac{b_0}{a_0}$$

ฉนั้น $y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$ ในระบบเชิงอุปมาน

$y[nT] = \frac{b_0}{a_0} x[nT]$ ในการจำลองเชิงตัวเลข

ระบบที่มีอันดับ = 1 จะได้

$$\frac{y(s)}{x(s)} = H(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_1 s + a_0}$$

แทนค่า s ด้วยสมการที่ 4

$$\frac{y(z)}{x(z)} = H(z) = \frac{b_1(\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}) + b_0}{a_1(\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}) + a_0}$$

$$\frac{y(z)}{x(z)} = \frac{(b_0 T - 2b_1)z^{-1} + (b_0 T + 2b_1)}{(a_0 T - 2a_1)z^{-1} + (a_0 T + 2a_1)}$$

$$y[nT] = \frac{(b_0 T + 2b_1)x[nT] + (b_0 T - 2b_1)x[nT - T] - (a_0 T - 2a_1)y[nT - T]}{(a_0 T + 2a_1)} \quad (3.18)$$

ตัวอย่างเช่น

ระบบมีสมการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$\frac{dy}{dt} = x(t) - \beta y(t)$$

ถ้าแปลงให้อยู่ในรูปของการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) จะได้

$$sY(s) = X(s) - \beta Y(s) \quad (3.19)$$

หรือ $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s + \beta}$ (3.20)

ถ้าแทนด้วย $\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$

จะได้ $$\frac{Y(z)}{X(z)} = H(z) = \frac{T(1+z^{-1})}{(\beta T+2)+(\beta T-2)z^{-1}} \quad (3.21)$$

ฉนั้น $$(\beta T+2)Y(z)+(\beta T-2)z^{-1}Y(z) = TX(z)+Tz^{-1}X(z)$$

$$Y(z) = \frac{TX(z)}{\beta T+2}+\frac{Tz^{-1}}{\beta T+2}X(z)-\frac{(\beta T-2)z^{-1}}{(\beta T+2)}Y(z)$$

$$Y(nT) = \frac{T}{\beta T+2}X(nT)+\frac{T}{\beta T+2}X(nT-T)-\frac{(\beta T-2)}{(\beta T+2)}Y(nT-T)$$

โดยที่กำหนดให้ที่เวลา t<0 ค่าสัญญาณเข้าและสัญญาณออก มีค่าเป็น 0

รูปแบบคือ

$$(a_0T-2a_1)Y_{[nT]} = (b_0T+2b_1)X_{[nT]}+(b_0T-2b_1)X_{[nT-T]}-(a_0T-2a_1)Y_{[nT-T]} \quad (3.22)$$

เพื่อให้เป็นรูปแบบที่ง่ายขึ้น ดังนี้

$$Z_a^{(0,1)}Y_{[nT]} = Z_b^{(0,1)}X_{(nT)}+Z_b^{(1,1)}X_{[nT-T]}-Z_a^{(1,1)}Y_{[nT-T]}$$

กรณีใช้ฟังก์ชันหนึ่งหน่วย (unit step function) เป็นสัญญาณเข้า ฉะนั้น X ใดๆ เท่ากับ 1 จะได้

$$Z_a^{(0,1)}Y_{[nT]} = Z_b^{(0,1)}+Z_b^{(1,1)}-Z_a^{(1,1)}Y_{[nT-T]}$$

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,1)}+Z_b^{(1,1)}-Z_a^{(1,1)}Y_{[nT-T]}}{Z_a^{(0,1)}} \quad (3.23)$$

กรณีอันดับ 2

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,2)}+Z_b^{(1,2)}+Z_b^{(2,2)}-Z_a^{(1,2)}Y_{[nT-T]}-Z_a^{(2,2)}Y_{[nT-2T]}}{Z_a^{(0,2)}} \quad (3.24)$$

กรณีอันดับ 3 จะได้

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,3)} + Z_b^{(1,3)} + Z_b^{(2,3)} + Z_b^{(3,3)} Y_{[nT-T]} - Z_a^{(2,3)} Y_{[nT-2T]} - Z_a^{(3,3)} Y_{[nT-3T]}}{Z_a^{(0,3)}} \quad (3.25)$$

2. การแปลงรูปแบบสมการเพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรม

ระบบที่มีอันดับ = 0 จะได้

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,0)} X_{[nT]}}{Z_a^{(0,0)}} \quad (3.26)$$

ระบบที่มีอันดับ = 1 จะได้

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,1)} X_{[nT]} + Z_b^{(1,1)} X_{[nT-T]} - Z_a^{(1,1)} Y_{[nT-T]}}{Z_a^{(0,1)}} \quad (3.27)$$

ระบบที่มีอันดับ = 2 จะได้

$$Y_{[nT]} = \frac{Z_b^{(0,2)} X_{[nT]} + Z_b^{(1,2)} X_{[nT-T]} + Z_b^{(2,2)} X_{[nT-2T]} - Z_a^{(1,2)} Y_{[nT-T]} - Z_a^{(2,2)} Y_{[nT-2T]}}{Z_a^{(0,2)}} \quad (3.28)$$

ระบบที่มีอันดับ = m จะได้

$$Z_a^{(0,m)} Y_{[nT]} = Z_b^{(0,m)} X_{[nT-0T]} + Z_b^{(1,m)} X_{[nT-1T]} + Z_b^{(2,m)} X_{[nT-2T]} + \ldots + Z_b^{(m,m)} X_{[nT-mT]}$$

$$- Z_a^{(1,m)} Y_{[nT-T]} - Z_a^{(2,m)} Y_{[nT-2T]} - \ldots - Z_a^{(m,m)} Y_{[nT-mT]} \quad (3.29)$$

โดยที่ $Y_{[nT]}$ คือ สัญญาณออก ณ เวลา nT ;n=1,2,3,...

T คือ ช่วงห่างของเวลาที่ใช้เลือกการสุ่ม

$Z_a^{(0,m)}, Z_a^{(1,m)}, \ldots, Z_a^{(m,m)}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ $Y_{[nT]}, Y_{[nT-T]}, \ldots, Y_{[nT-mT]}$

$Z_b^{(0,m)}, Z_b^{(1,m)}, \ldots, Z_b^{(m,m)}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ $X_{[nT]}, X_{[nT-T]}, \ldots, X_{[nT-mT]}$

m = อันดับของระบบ

$Z_a^{(x,y)} = Z_b^{(x,y)} = Z^{(x,y)}$ สามารถหาสัมประสิทธิ์ได้โดยการแทนค่า

$$s = D(z) = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

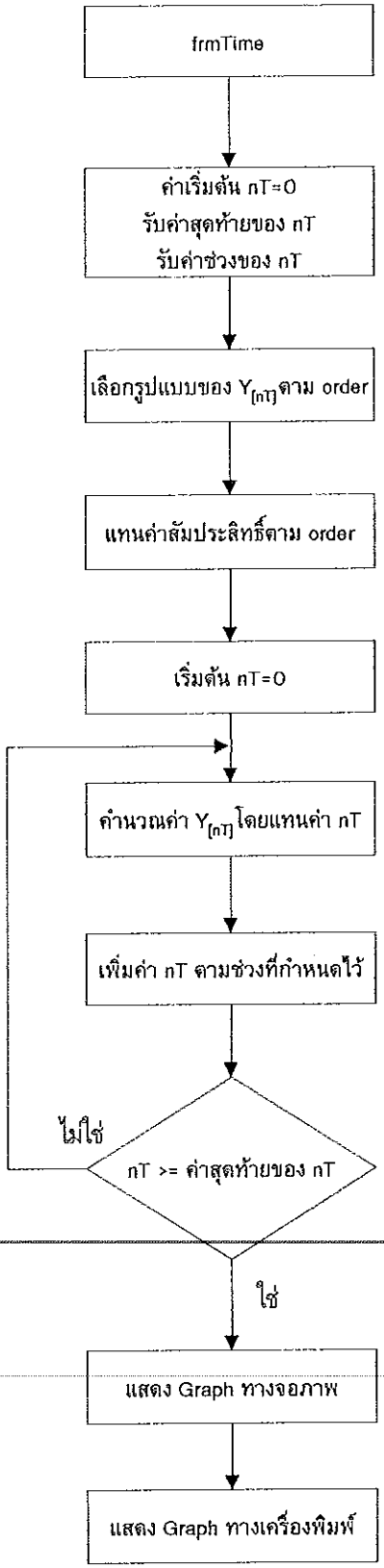
ในที่นี้จะจำกัดไว้ที่อันดับ = 5 ดังนี้

ตาราง 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ $Z^{(x,y)}$

x	y	$Z^{(x,y)}$
0	0	b_0
0	1	b_0T+2b_1
0	2	$b_0T^2+2b_1T+2^2b_2$
0	3	$b_0T^3+2b_1T^2+2^2b_2T+2b_3$
0	4	$b_0T^4+2b_1T^3+2^2b_2T^2+2^3b_3T+2^4b_4$
0	5	$b_0T^5+2b_1T^4+2^2b_2T^3+2^3b_3T^2+2^4b_4T+2^5b_5$
1	0	0
1	1	b_0T-2b_1
1	2	$2b_0T^2-0(2)b_1T-2(2^2)b_2$
1	3	$3b_0T^3+2b_1T^2-2^2b_2T-3(2^3)b_3$
1	4	$4b_0T^4+2b_12T^3+0b_22^2T^2-2b_32^3T-4b_42^4$
1	5	$5b_0T^5+3b_12T^4-b_22^2T^3-b_32^3T^2-3b_42^4T-5b_52^5$
2	0	0
2	1	0
2	2	$b_0T^2-b_12T+b_2(2^2)$
2	3	$3b_0T^3-b_12T^2-b_2(2^2)T+3b_3(2^3)$
2	4	$6b_0T^4+0b_12T^3-2b_22^2T^2+0b_32^3T+6b_42^4$
2	5	$10b_0T^5+2b_12T^4-2b_22^2T^3-2b_32^3T^2+2b_42^4T+10b_52^5$
3	0	0
3	1	0
3	2	0
3	3	$b_0T^3-b_12T^2+b_22^2T-b_32^3$
3	4	$4b_0T^4-2b_12T^3+0b_22^2T^2+2b_32^3T-4b_42^4$
3	5	$10b_0T^5-2b_12T^4-2b_22^2T^3+2b_32^3T^2+2b_42^4T-10b_52^5$
4	0	0
4	1	0

ตาราง 1 (ต่อ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ $Z^{(x,y)}$

x	y	$Z^{(x,y)}$
4	2	0
4	3	0
4	4	$b_0T^4 - b_1 2T^3 + b_2 2^2 T^2 - b_3 2^3 T + b_4 2^4$
4	5	$5b_0T^5 - 3b_1 2T^4 + b_2 2^2 T^3 + b_3 2^3 T^2 - 3b_4 2^4 T + 5b_5 2^5$
5	0	0
5	1	0
5	2	0
5	3	0
5	4	0
5	5	$b_0T^5 - b_1 2T^4 + b_2 2^2 T^3 - b_3 2^3 T^2 + b_4 2^4 T - b_5 2^5$



ภาพประกอบ 9 สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

การพัฒนาโปรแกรมกราฟทางเดินของราก

ตามหลักการพื้นฐานของทางเดินของราก เป็นการหารากของสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองของระบบ โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัวในสมการแล้วศึกษาดูว่ารากของสมการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร รากของสมการที่ต้องหาในแต่ละครั้งคือ การหารากหรือโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนในวงรอบปิด จากภาพประกอบ 4 รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด คือ

$$F(s) = \frac{K(x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots + a_1 s + a_0)(n_2 s^2 + n_1 s + n_0)}{(y_2 s^2 + y_1 s + y_0)(b_9 s^9 + b_8 s^8 + \ldots + b_1 s + b_0)(n_2 s^2 + n_1 s + n_0) + K(x_2 s^2 + x_1 s + x_0)(a_9 s^9 + a_8 s^8 + \ldots + a_1 s + a_0)(n_2 s^2 + n_1 s + n_0)} \quad (3.30)$$

ในการหารากของสมการจะใช้วิธีการคูณแบบพหุนามของส่วนให้อยู่ในรูปของ

$$y_0 + y_1 s + y_2 s^2 + y_3 s^3 + \ldots + y_n s^n$$

จากนั้นจะใช้วิธีการหารากโดยวิธีแบร์สโตว โดยแปลงรูปแบบพหุนามให้อยู่ในรูปของตัวประกอบ คือ

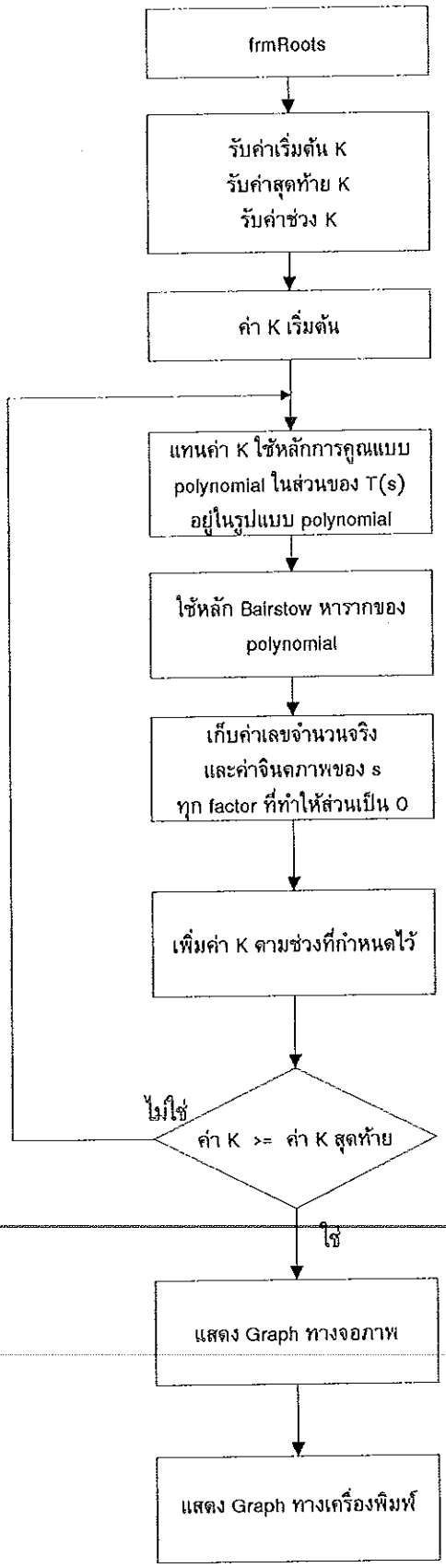
$$(b_{11} s + b_{12} + b_{13} j) + (b_{21} s + b_{22} + b_{23} j) + \ldots + (b_{n1} s + b_{n2} + b_{n3} j)$$

แล้วทำการหาค่า s ที่ทำให้ส่วนเป็น 0 ของแต่ละตัวประกอบ เช่น

$$(b_{11} s + b_{12} + b_{13} j) = 0$$

$$s = \frac{-b_{12}}{b_{11}} + \frac{-b_{13}}{b_{11}} j$$

ฉะนั้นค่าที่ทำให้ $s = 0$ คือ เลขจำนวนจริง $\frac{-b_{12}}{b_{11}}$ และเลขจินตภาพ $\frac{-b_{13}}{b_{11}}$ โดยใช้วิธีนี้หาทุกตัวประกอบจะได้เลขจำนวนจริงและเลขจินตภาพ เท่ากับจำนวนวงเล็บของส่วนที่ค่า K ใด ๆ



ภาพประกอบ 10 สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟทางเดินของราก

การพัฒนาโปรแกรมกราฟโพลาร์

เนื่องจากการวิเคราะห์เชิงความถี่ เป็นการวิเคราะห์ผลตองสนองในภาวะอยู่ตัวของระบบ เมื่อใช้สัญญาณแบบไซน์เป็นสัญญาณเข้า โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาจาก 2 ส่วนด้วยกันคือ พิจารณาจากขนาด และ เฟส ของสัญญาณออกที่ความถี่ใด ๆ ถ้าสมการระบบเป็น G(s) เมื่อแทนค่า s ด้วย jw

$$G(jw) = G(s)\big|_{s=jw} = R(jw) + jX(jw) = |G(jw)|\angle G(jw)$$

ซึ่ง $R(jw) = R_e(G(jw))$

$$X(jw) = I_m(G(jw))$$

และ $\angle G(jw) = \tan^{-1}\dfrac{X(jw)}{R(jw)} = \theta$

โดยใช้หลักการดังนี้

1. เลือกสมการ $T(s)$ ในรูปแบบของตัวประกอบ

$$T(s) = \frac{(a_{11}s + a_{12} + a_{13}j)(a_{21}s + a_{22} + a_{23}j)\ldots(a_{91}s + a_{92} + a_{93}j)}{(b_{11}s + b_{12} + b_{13}j)(b_{21}s + b_{22} + b_{23}j)\ldots(b_{91}s + b_{92} + b_{93}j)} \qquad (3.31)$$

2. หาขนาดและเฟสของแต่ละวงเล็บทั้งเศษและส่วน โดยแทนค่า $s = jw = j2\pi f$ เช่น

$$(a_{11}s + a_{12} + a_{13}j) = a_{11}jw + a_{12} + a_{13}j$$

$$= a_{12} + (a_{11}2\pi f + a_{13})j \qquad (3.32)$$

ขนาด $M = \sqrt{(a_{12})^2 + (a_{11}2\pi f + a_{13})^2}$

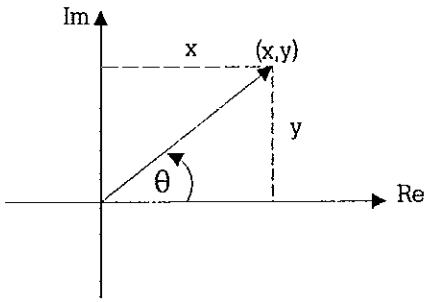
มุม $\theta = \tan^{-1}\dfrac{(a_{11}2\pi f + a_{13})}{a_{12}}$

3. หาขนาด M รวม โดยเอาขนาด M แต่ละวงเล็บของเศษมาคูณกันและเอาขนาด M แต่ละวงเล็บของส่วนมาคูณกันจะได้ขนาด M รวม ที่ความถี่ใด ๆ โดยเอาขนาด M ของเศษหารด้วยขนาด M ของส่วน

4. หามุม θ รวมโดยเอามุม θ แต่ละวงเล็บหาเศษมาบวกกันและเอามุม θ แต่ละวงเล็บของส่วนมาบวกกัน จะได้มุม θ รวมที่ความถี่ใด ๆ โดยเอามุม θ ของเศษลบด้วยมุม θ ของส่วน

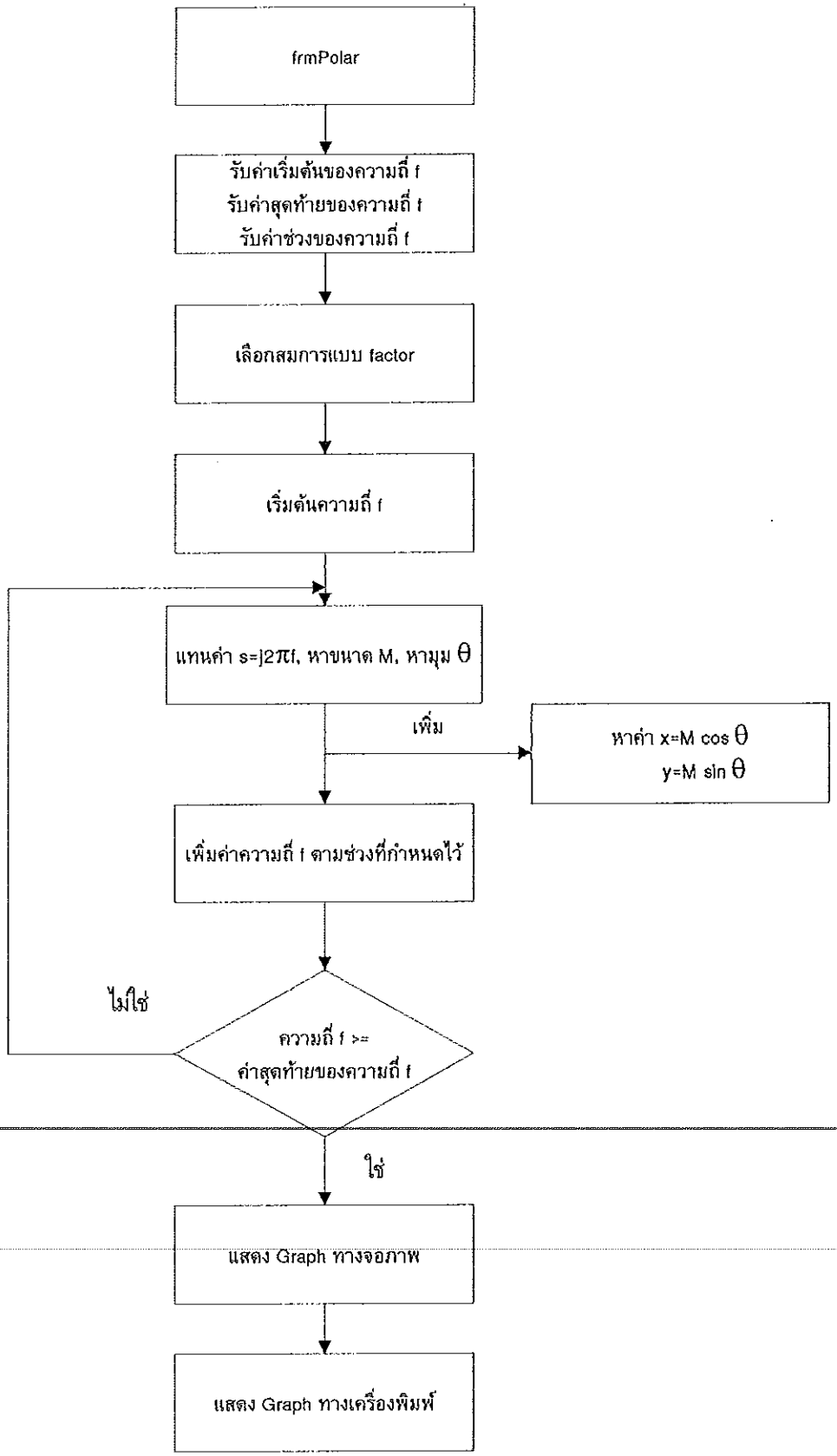
5. จะได้ $(M_1,\theta_1),(M_2,\theta_2),(M_3,\theta_3),...(M_n,\theta_n)$ ที่ความถี่ n ใด ๆ

6. นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟ ดังนี้



ภาพประกอบ 11 กราฟ จุด (x,y) จาก M,θ

โดยหาค่า x,y ได้คือ $x = M\cos\theta, y = M\sin\theta$ นำค่า x,y ที่ได้ไปแสดงกราฟในแต่ละความถี่ที่คำนวณได้



ภาพประกอบ 12 สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟโพลาร์

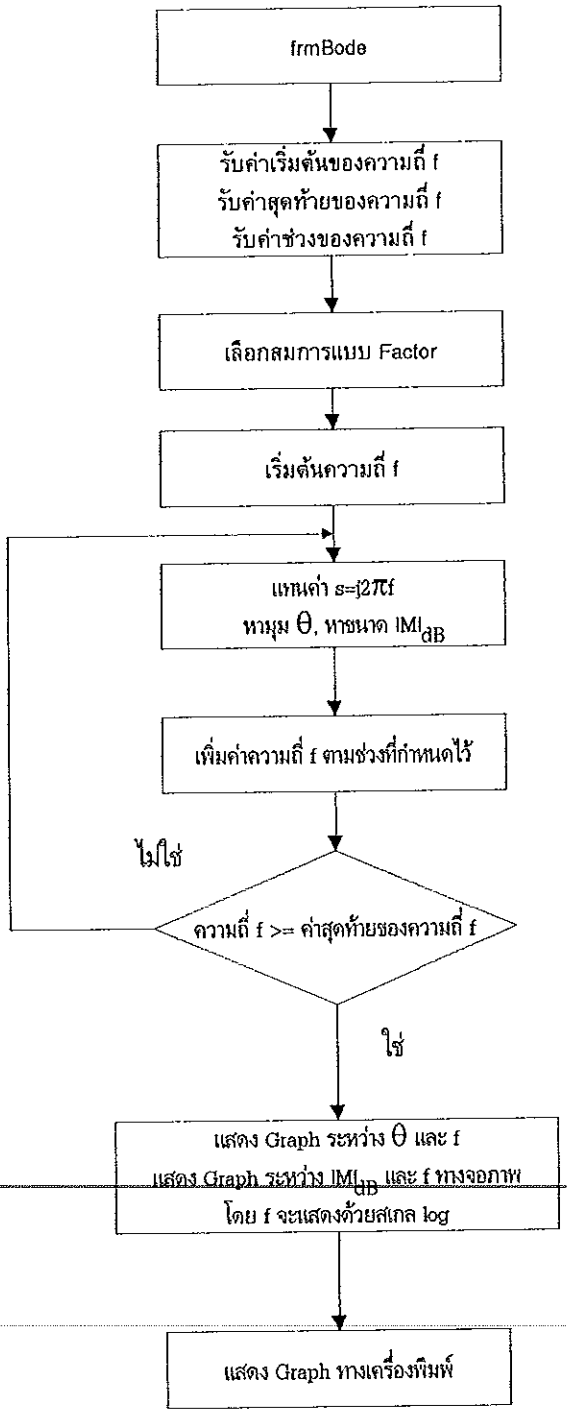
การพัฒนาโปรแกรมกราฟโบเด

การวิเคราะห์เชิงความถี่แบบกราฟโบเดนั้นจะทำการหาค่าขนาด M และมุม θ เช่นเดียวกับกราฟโพลาร์ต่างกันในส่วนวิธีของการแสดงกราฟ โดยแยกกราฟเป็นสองส่วนคือ กราฟแสดงขนาดในหน่วยเดซิเบล ที่ความถี่ใด ๆ และกราฟแสดง θ ที่ความถี่ใด ๆ โดยค่าความถี่ f จะใช้สเกลล็อกในการแสดงผลดังนี้

1. หาขนาด M และมุม θ ที่ความถี่ใด ๆ เช่นเดียวกับกราฟโพลาร์
2. ทำการแปลงค่าขนาด M ในหน่วยของเดซิเบลดังนี้

$$|M|_{dB} = 20\log_{10}|M|$$

3. แสดงกราฟ ขนาด $|M|_{dB}$ กับความถี่ f ในสเกลล็อก
4. แสดงกราฟ มุม θ กับความถี่ f ในสเกลล็อก



ภาพประกอบ 13 สายงานแสดงการทำงานของโปรแกรมกราฟโบเด

บทที่ 4

ผลการวิจัย

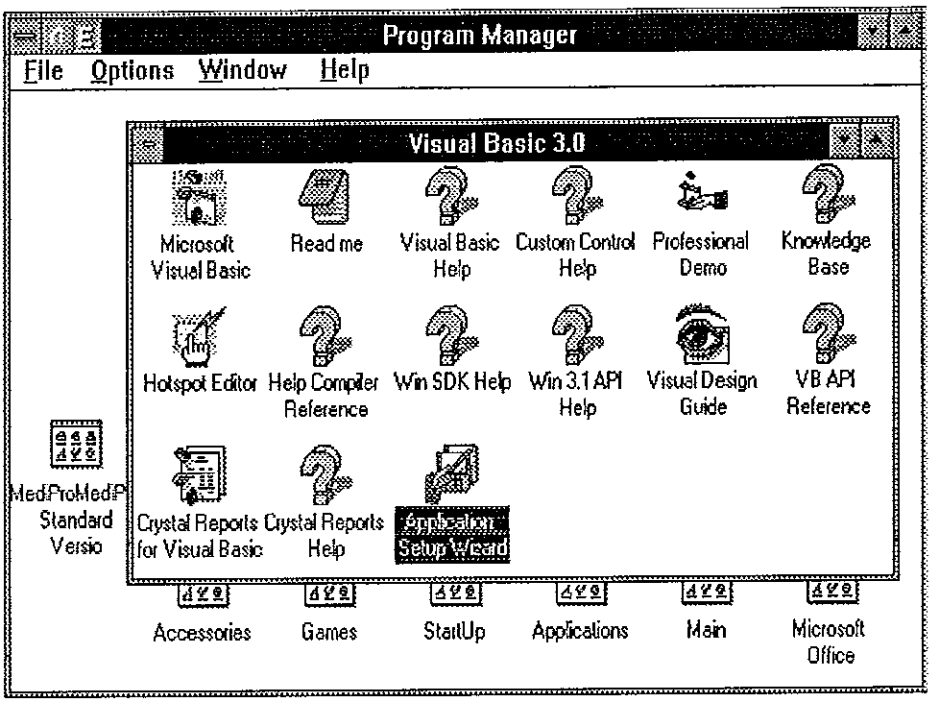
ข้อกำหนดของระบบ

ในการพัฒนาโปรแกรมนี้สามารถแสดงกราฟได้เพียง 4 ลักษณะ คือ กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา, กราฟโพลาร์, กราฟทางเดินของราก และกราฟโบเด ซึ่งมีข้อกำหนดและขอบเขตดังต่อไปนี้

1. ส่วนของโครงสร้างของระบบจะประกอบด้วย D(s), K, G(s) และ H(s)
2. เลือกวิธีการวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะคือ ระบบเปิด และ ระบบปิด
3. บันทึกสมการของระบบได้ 2 แบบคือ แบบตัวประกอบ และพหุนาม
4. สมการ D(s) และ H(s) มีอันดับไม่เกิน 2
5. ค่า K เป็นค่าคงที่ เป็นจำนวนจริง
6. สมการ G(s) มีอันดับไม่เกิน 9
7. สมการรวมของทั้งระบบไม่ว่าจะเป็น ระบบเปิด หรือ ระบบปิด มีอันดับไม่เกิน 9
8. เฉพาะในส่วนของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาสมการของทั้งระบบมีอันดับไม่เกิน 5
9. โปรแกรมนี้สามารถใช้งานบน Microsoft Windows 3.1 ขึ้นไป
10. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้
    - 10.1 CPU 80386 ขึ้นไป
    - 10.2 มีหน่วยความจำไม่น้อยกว่า 8 Mbytes
    - 10.3 จอภาพสี VGA ขึ้นไป

การเตรียมแผ่นจานบันทึกติดตั้งโปรแกรม

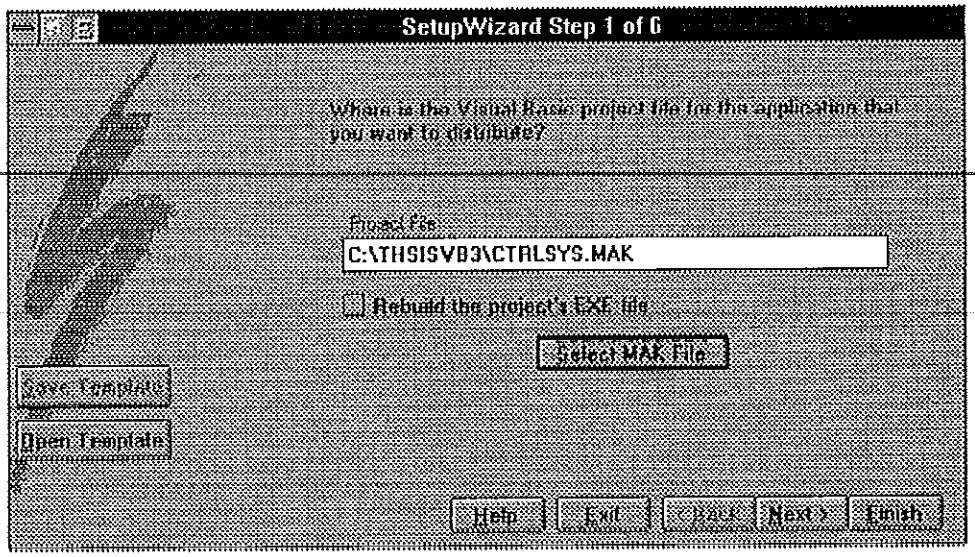
ในการจัดทำแผ่นการติดตั้งโปรแกรมที่สร้างจากวิชวลเบสิกสามารถสร้างจาก Application Setup Wizard ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงไอคอนของ Application Wizard

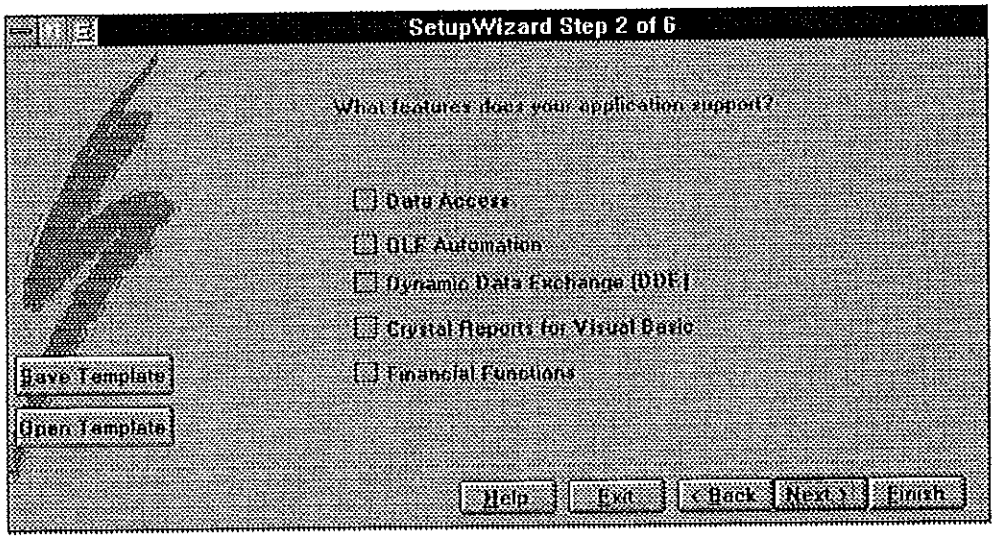
ในการจัดทำมีขั้นตอนดังนี้

1. เรียกโปรแกรม Setup Wizard ทำการเปิดโครงงาน (project) ดังรูป จากนั้นเลือก ปุ่ม Next เพื่อทำการเปิดโครงงานรวมทั้งแฟ้มข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในโครงงานนี้ขึ้นมา ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงหน้าจอแรกของ Setup Wizard

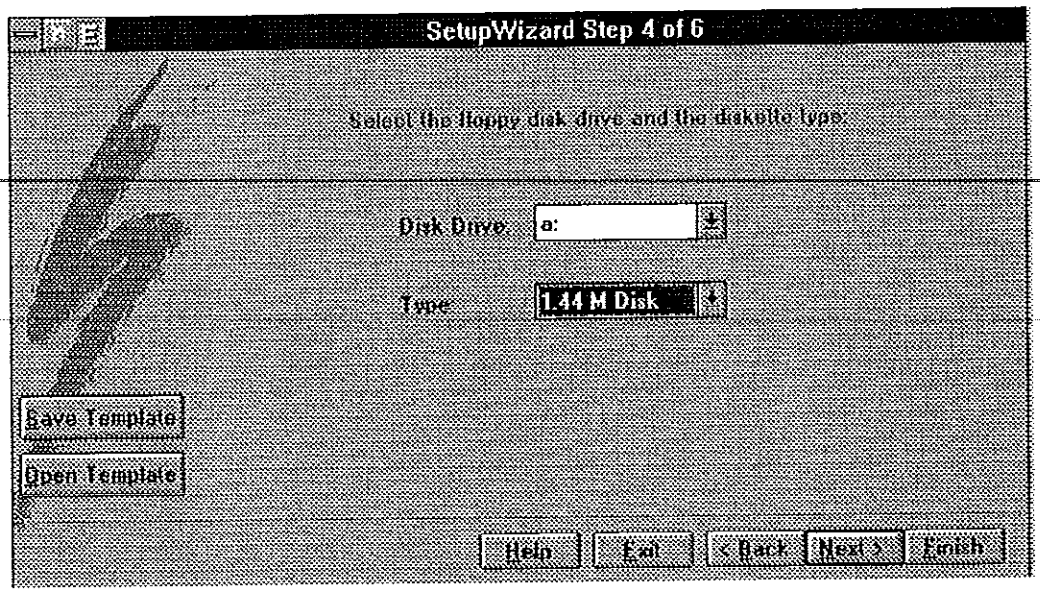
2. หน้าจอจะมาอยู่ที่หน้าที่ 2 ดังนี้



ภาพประกอบ 16 แสดงหน้าจอที่ 2 ของ Setup Wizard

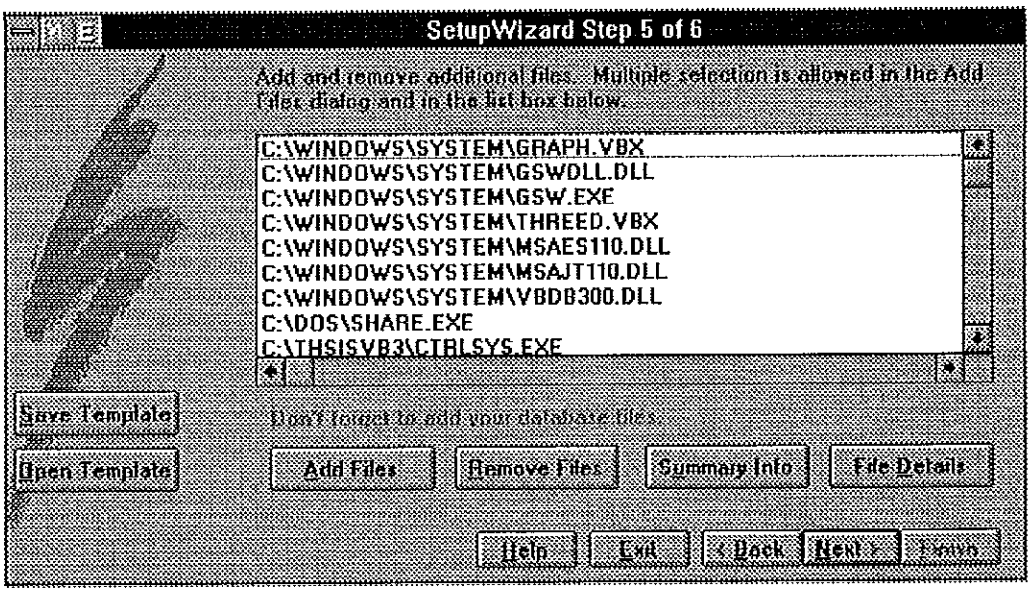
เป็นขั้นตอนที่กำหนดให้โปรแกรมว่าในโครงงานได้ใช้ส่วนไหนบ้างในการพัฒนาโปรแกรม เพื่อนำแฟ้มข้อมูลที่จำเป็นบรรจุลงไปในจานบันทึกผ่านขั้นตอนนี้ โดยการเลือกปุ่ม Next

3. หลังจากนั้นโปรแกรม จะมาให้เลือกหน่วยขับ (drive) และขนาดความจุของแผ่นจานบันทึก ที่ใช้สำหรับทำแผ่นการติดตั้ง โดยเลือก A : และ 1.44 Mdisk ดังรูป แล้วเลือก ปุ่ม Next



ภาพประกอบ 17 แสดงหน้าจอที่ 4 ของ Setup Wizard

4. หน้าจอจะแสดงรายการแฟ้มข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นในการใช้งานโปรแกรม Ctrlsys ซึ่งปุ่มให้เลือกสำหรับการจัดการแฟ้มข้อมูลต่างๆ มีการเพิ่ม และลบออก



ภาพประกอบ 18 แสดงหน้าจอที่ 5 ของ Setup Wizard

ซึ่งในโครงงาน Ctrlsys มีแฟ้มข้อมูลที่จำเป็นดังนี้

File 1 = C:\WINDOWS\SYSTEM\GRAPH.VBX

File 2 = C:\WINDOWS\SYSTEM\GSWDLL.DLL

File 3 = C:\WINDOWS\SYSTEM\GSW.EXE

File 4 = C:\WINDOWS\SYSTEM\THREED.VBX

File 5 = C:\WINDOWS\SYSTEM\MSAES110.DLL

File 6 = C:\WINDOWS\SYSTEM\MSAJT110.DLL

File 7 = C:\WINDOWS\SYSTEM\VBDB300.DLL

File 8 = C:\DOS\SHARE.EXE

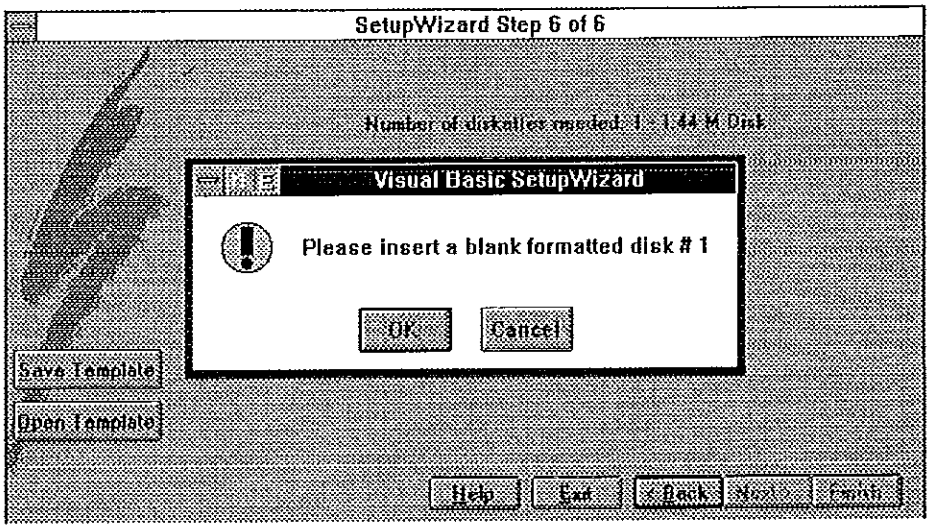
File 9 = C:\THSISVB3\CTRLSYS.EXE

File 10 = C:\THSISVB3\CTRLDATA.MDB

File 11 = C:\THSISVB3\CTRLSYS.HLP

File 12 = C:\WINDOWS\SYSTEM\MSAFINX.DLL

เลือกปุ่ม Next เพื่อให้ทำขั้นตอนถัดไป



ภาพประกอบ 19 แสดงหน้าจอที่ 6 ของ Setup Wizard

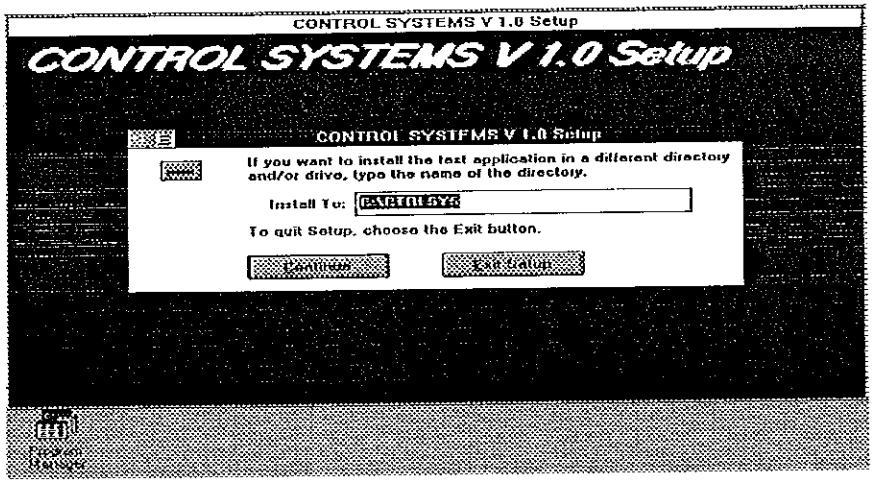
5. หลังการจัดการแฟ้มข้อมูลต่างๆ เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะทำการอัดแน่นข้อมูลเพื่อให้ใช้ในการนำลงแผ่นจานบันทึก แล้วจะทำการเรียกหาแผ่นพร้อมทั้งบอกจำนวนแผ่นจานบันทึกที่ต้องใช้ทั้งหมด ในขั้นตอนนี้ให้ทำการใส่แผ่นเปล่าเข้าไป โปรแกรมจะทำการสำเนาแฟ้มข้อมูลที่ได้ทำการอัดแน่นไว้แล้วลงแผ่นจานบันทึกเป็นการเสร็จสิ้นการเตรียมแผ่นจานบันทึกเพื่อการติดตั้ง

ภาพประกอบ 20 แสดงหน้าจอเสร็จสิ้นการเตรียมแผ่นดิสก์เพื่อการติดตั้ง

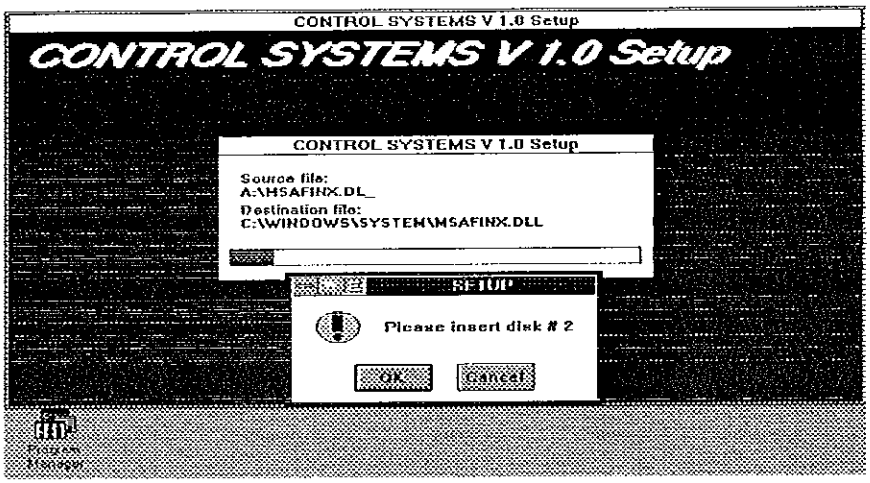
การติดตั้งโปรแกรม

ดำเนินการดังนี้

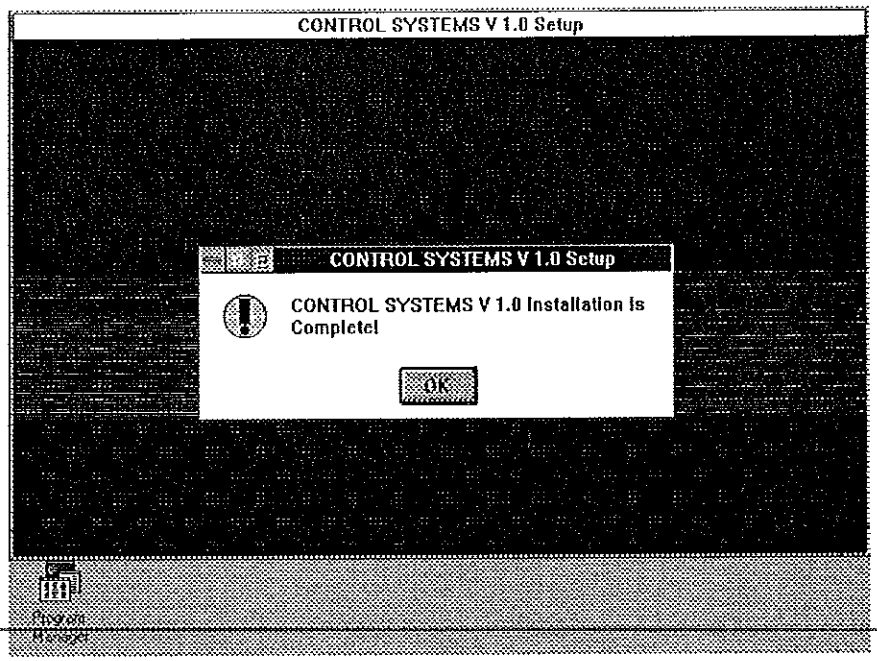
1. เปิด Windows
2. ใส่จานบันทึกแผ่นที่ 1 เข้าไป
3. จาก Program Manager เลือก Menu FILE -> RUN
4. พิมพ์ A:\SETUP กด Enter
5. หลังจากนั้นให้ทำตามขั้นตอนตามหน้าจอแสดงการติดตั้งกับผู้ใช้ จะมีการเรียกหา แผ่นต่อไป กรณีที่มีมากกว่า 1 แผ่น และแจ้งข้อความเพื่อบอกว่าติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว



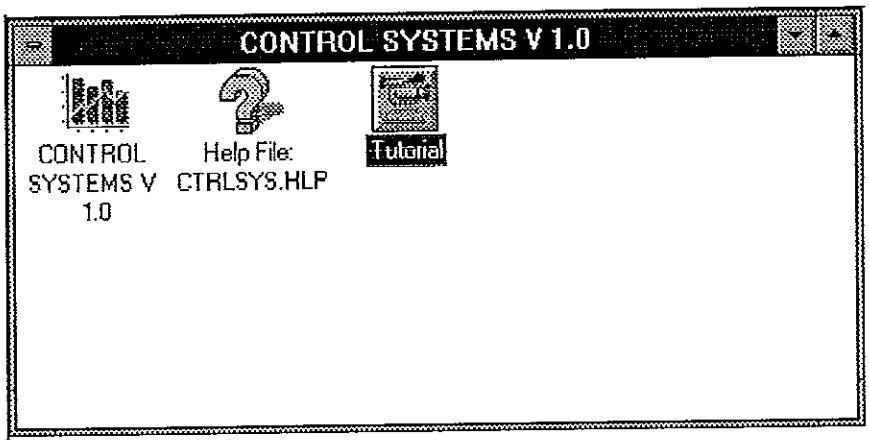
ภาพประกอบ 21 แสดงหน้าจอแรกของการติดตั้ง



ภาพประกอบ 22 แสดงหน้าจอการเรียกหาแผ่นที่ 2



ภาพประกอบ 23 แสดงหน้าจอเสร็จสิ้นการติดตั้ง

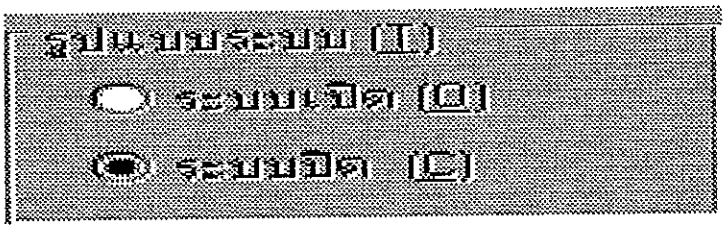


ภาพประกอบ 24 แสดงไอคอนในกลุ่มของระบบควบคุม

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

1. การเลือกรูปแบบระบบ

ก่อนที่จะทำการเลือกสูตรหรือเพิ่มสูตรใหม่ เพื่อจะใช้ในการคำนวณ ผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกรูปแบบระบบก่อนว่าต้องการจะใช้รูปแบบระบบแบบใด ดังรูป

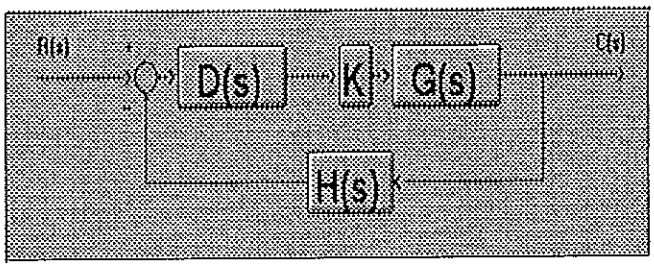


ภาพประกอบ 25 แสดงหน้าจอการเลือกรูปแบบระบบ

เมื่อผู้ใช้งานต้องการเลือกรูปแบบระบบรูปแบบใด ให้เลื่อนเมาส์ (mouse) ไปที่รูปแบบระบบ ดังรูปข้างต้น แล้วให้กดคลิ๊กที่ปุ่มด้านซ้ายของเมาส์ 1 ครั้ง ด้านหน้าของระบบจะกลายเป็นจุดสีดำอยู่ภายในวงกลม ซึ่งแสดงว่าได้เลือกรูปแบบระบบเรียบร้อยแล้ว เป็นต้น

2. การเลือกรูปแบบของสูตรที่จะใช้ในการคำนวณ

เมื่อทำการเลือกรูปแบบระบบเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการเลือกสูตรที่จะใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีตัวอย่างแสดงให้ดู ดังรูป

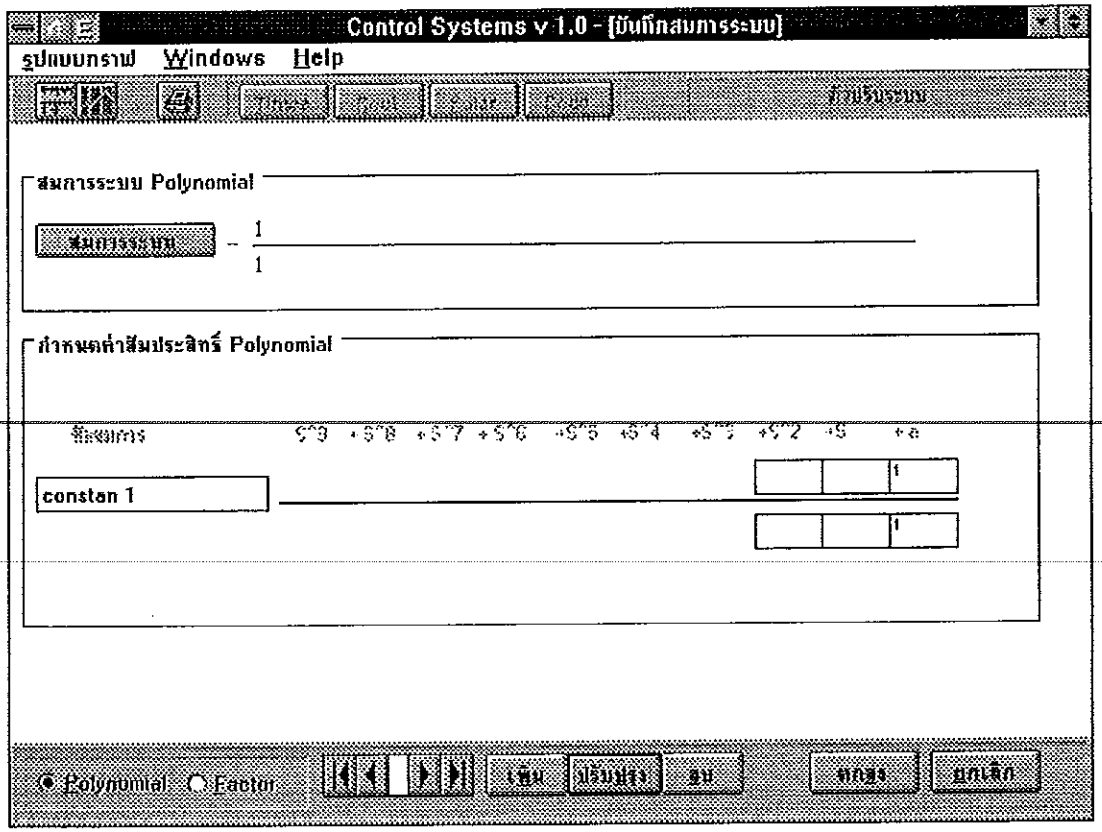


ภาพประกอบ 26 แสดงหน้าจอการเลือกรูปแบบสูตร

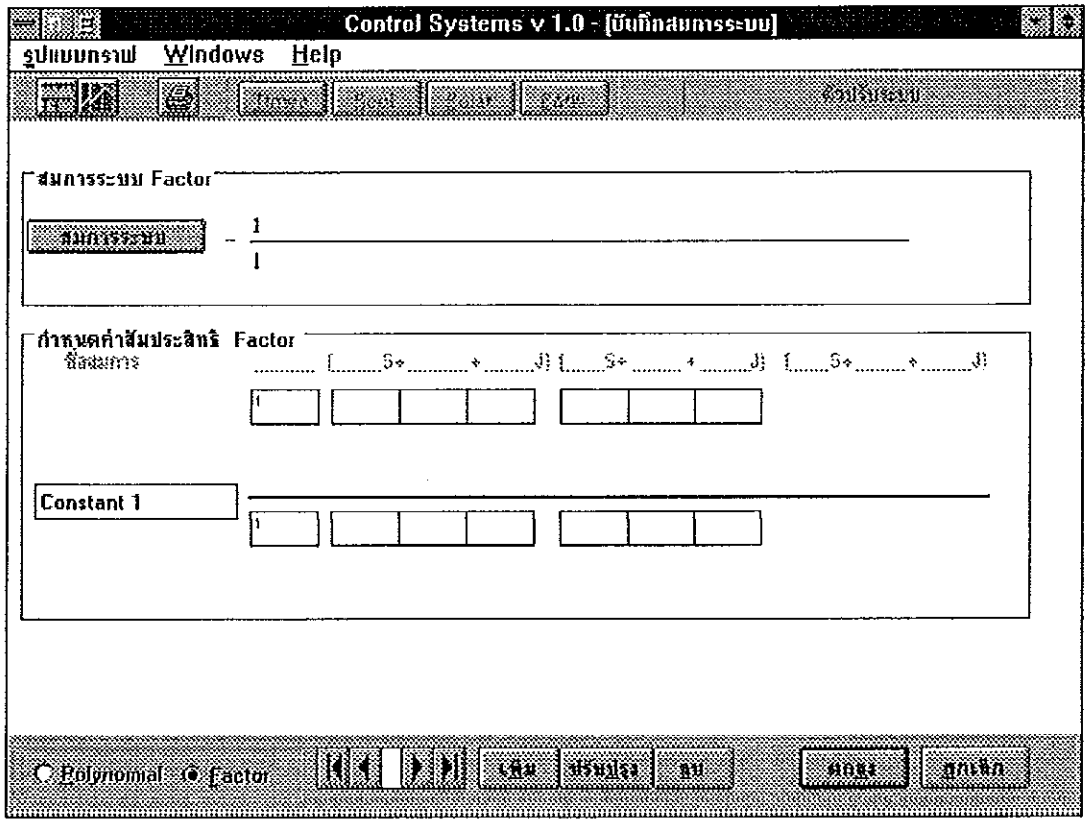
ซึ่งปุ่ม D(s) K G(s) H(s) ทั้ง 4 ปุ่มนี้ ปุ่มใดจะสามารถใช้งานได้บ้างจะขึ้นอยู่กับการเลือกรูปแบบระบบในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งถ้าปุ่มใดใช้งานได้ตัวอักษรที่อยู่ในปุ่มนั้น ๆ จะเป็นตัวสีดำ ถ้าปุ่มใดไม่สามารถใช้งานได้ ตัวอักษรจะเป็นสีเทา ดังรูปข้างต้น

2.1 วิธีการเลือกสูตร

2.1.1 D(s) ตัวปรับระบบ ให้เลือกปุ่ม D(s) หน้าจอก็จะแสดงรายละเอียด ดังนี้

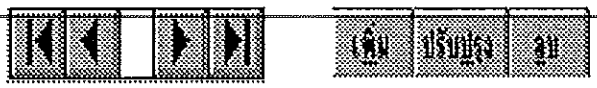


ภาพประกอบ 27 รูปแบบหน้าจอสมการระบบแบบพหุนาม



ภาพประกอบ 28 รูปแบบหน้าจอ สมการระบบ แบบ Factor

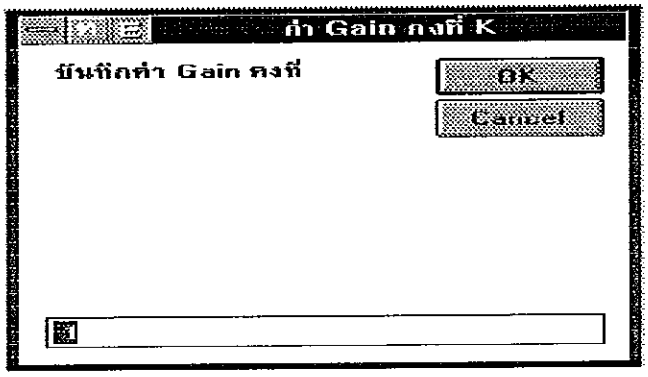
ให้ผู้ใช้งานเข้าไปเรียกรูปแบบสมการระบบ ว่าต้องการสมการระบบแบบพหุนาม หรือตัวประกอบ ถ้าต้องการเลือกสมการระบบใด เมื่อได้สมการระบบตามที่ต้องการแล้วให้ผู้ใช้งานเลือกชื่อสมการ โดยใช้ปุ่มการทำงาน ดังนี้



ถ้าต้องการตั้งชื่อสมการใหม่ ให้เลือกปุ่ม ก็จะมีเคอร์เซอร์ กระพริบอยู่ที่ชื่อสมการ ให้ผู้ใช้งาน ใส่ชื่อสมการที่ต้องการเพิ่ม และให้เพิ่มค่าในแต่ละพจน์ของสมการ เสร็จแล้วให้เลือกปุ่ม เป็นการเสร็จสิ้นการเพิ่มชื่อสมการ เมื่อได้สมการระบบ ตามที่ต้องการก็ให้ตอบตกลง ก็จะกลับไปสู่หน้าจอ ระบบสมการ

2.1.2 K ค่ากำลังขยายคงที่

ให้เลือกปุ่ม หน้าจอก็จะแสดงรายละเอียด ดังรูป



ภาพประกอบ 29 แสดงหน้าจอบันทึกค่ากำลังขยายคงที่

ให้ผู้ใช้งานเพิ่มค่าคงที่ของสมการตามที่ต้องการได้เลย เสร็จแล้วก็ตอบตกลง ก็จะกลับไปสู่หน้าจอระบบสมการ

2.1.3 G(s) ระบบหลัก

ให้เลือกปุ่ม หน้าจอก็จะแสดงรายละเอียด ดังรูป

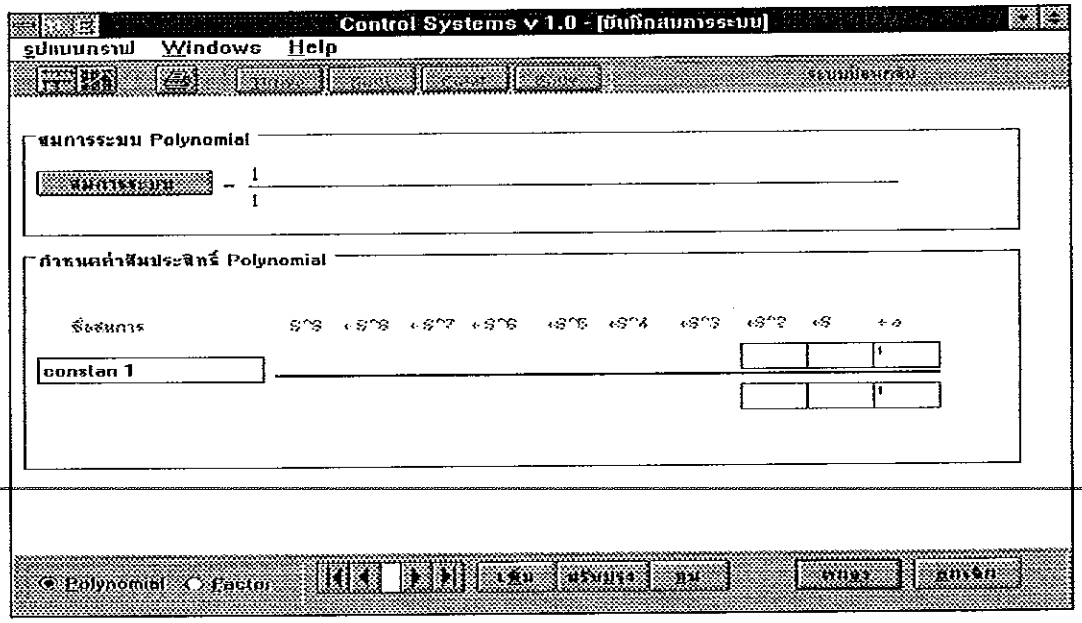
ภาพประกอบ 30 แสดงหน้าจอบันทึกสมการของระบบหลัก

ให้ผู้ใช้งานเข้าไปเรียกรูปแบบสมการระบบ ว่าต้องการสมการระบบแบบพหุนาม หรือตัวประกอบ ถ้าต้องการเลือกสมการระบบใด เมื่อได้สมการระบบตามที่ต้องการแล้วให้ผู้ใช้งานเลือกชื่อสมการ โดยใช้ปุ่มการทำงาน ดังนี้

ถ้าต้องการตั้งชื่อสมการใหม่ ให้เลือกปุ่ม ก็จะมีเคอร์เซอร์ กระพริบอยู่ที่ชื่อสมการ ให้ผู้ใช้งานใส่ชื่อสมาการที่ต้องการเพิ่ม และให้ เพิ่มค่าในแต่ละพจน์ของสมการ เสร็จแล้วให้เลือกปุ่ม เป็นการเสร็จสิ้นการเพิ่มชื่อสมการ เมื่อได้สมการระบบ ตามที่ต้องการก็ให้ตอบตกลงก็ จะกลับไปสู่หน้าจอ ระบบสมการ

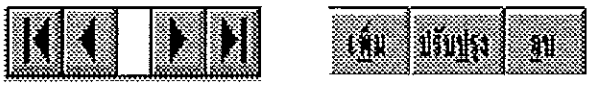
2.1.4. H(s) ระบบป้อนกลับ

ให้เลือกปุ่ม หน้าจอก็จะแสดงรายละเอียด ดังรูป



ภาพประกอบ 31 แสดงหน้าจอบันทึกสมการของตัวปรับระบบหรือระบบป้อนกลับ

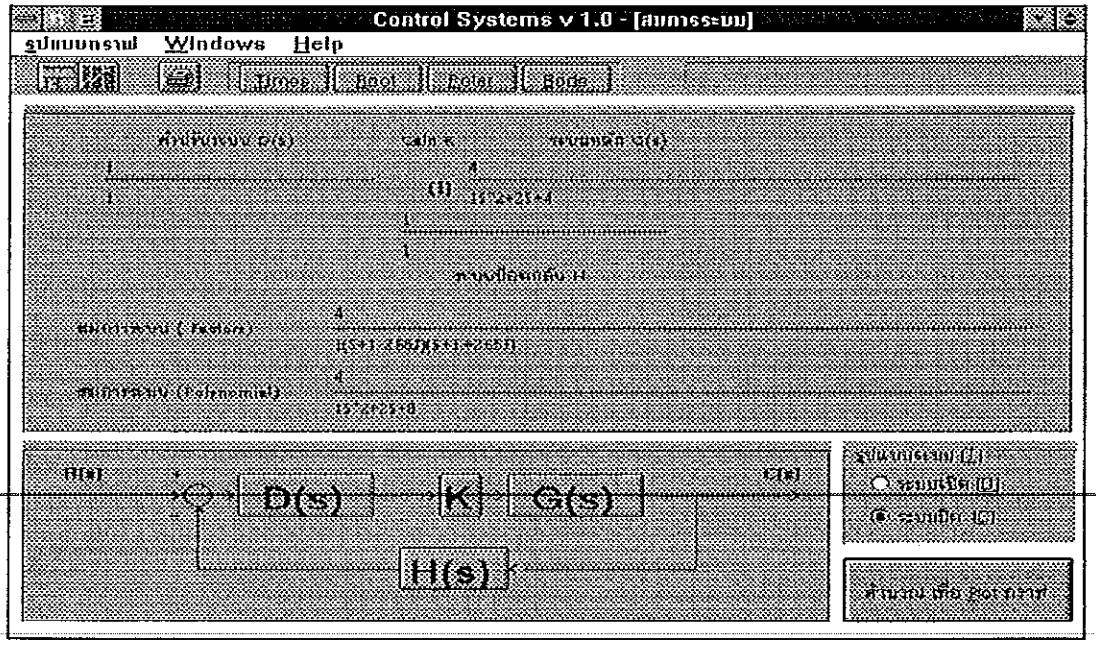
ให้ผู้ใช้งานเข้าไปเรียกรูปแบบสมการระบบ ว่าต้องการสมการระบบแบบพหุนาม หรือตัวประกอบ ถ้าต้องการเลือกสมการระบบใด เมื่อได้สมการระบบตามที่ต้องการแล้วให้ผู้ใช้งานเลือกชื่อสมการ โดยใช้ปุ่มการทำงาน ดังนี้



ถ้าต้องการตั้งชื่อสมการใหม่ ให้เลือกปุ่ม เพิ่ม ก็จะมีเคอร์เซอร์ กระพริบอยู่ที่ชื่อสมการ ให้ผู้ใช้งานใส่ชื่อสมการที่ต้องการเพิ่ม และให้เพิ่ม ค่าในแต่ละพจน์ของ สมการ เสร็จแล้วให้เลือกปุ่ม ปรับปรุง เป็นการเสร็จสิ้นการเพิ่มชื่อสมการ เมื่อได้สมการระบบตามที่ต้องการก็ให้ตอบตกลงก็จะกลับ ไปสู่หน้าจอ ระบบสมการ

3. การสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณสูตร

เมื่อเลือกสูตรได้ตามที่ต้องการแล้วให้ผู้ใช้งานสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณค่าของสูตรเหล่านั้น โดยให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม คำนวณ เพื่อ Plot กราฟ โปรแกรมก็จะทำการคำนวณสูตรที่ได้เลือกไว้ทันที ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 แสดงหน้าจอหลักของระบบควบคุม

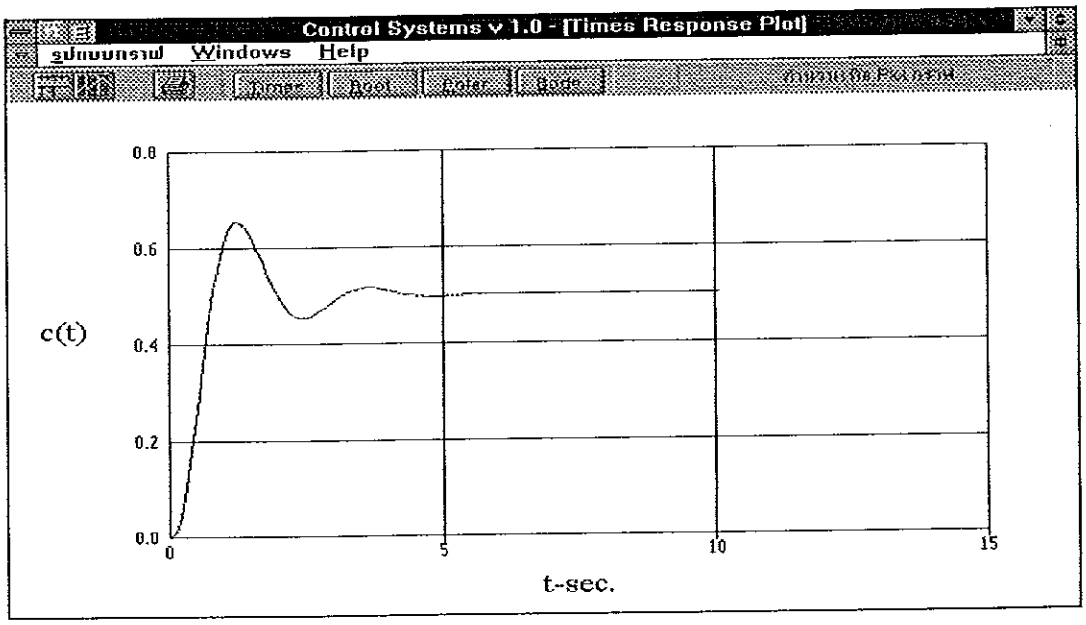
4. การเลือกรูปแบบของกราฟ

เมื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณสูตรเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการเลือกกราฟ เพื่อใช้แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสูตรนั้นๆ

รูปแบบของกราฟ จะมี 4 รูปแบบ ดังนี้

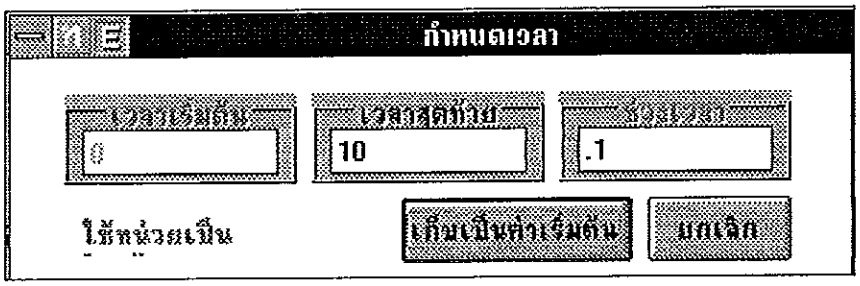
4.1. กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

เมื่อเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรูปแบบของกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงผลลัพธ์บนกราฟ ดังภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 แสดงหน้าจอของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

เมื่อกำหนดช่วงเวลาในการแสดงกราฟ ให้เลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรายละเอียด ดังรูป

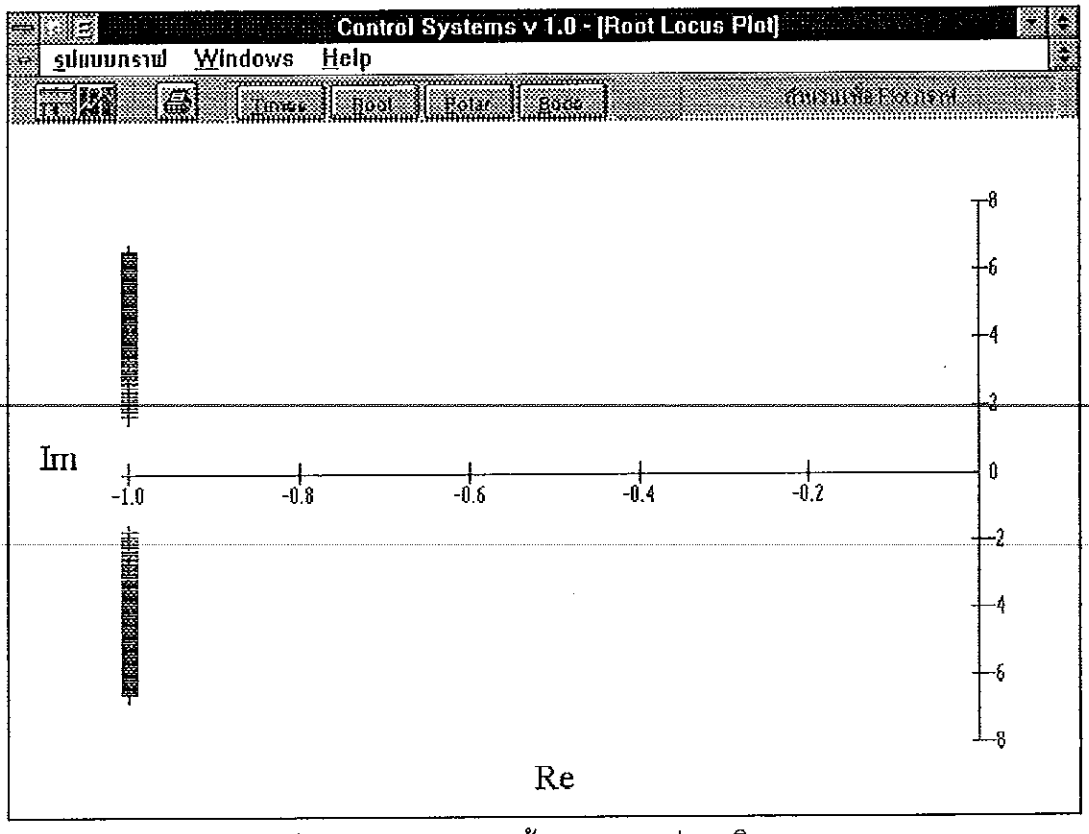


ภาพประกอบ 34 แสดงหน้าจอกำหนดช่วงของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลา

เมื่อทำการเพิ่มข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกปุ่ม ก็จะกลับไปสู่หน้าจอ การแสดงผลลัพธ์บนกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม อีกครั้ง ก็จะได้รูปแบบของกราฟตามที่ต้องการ

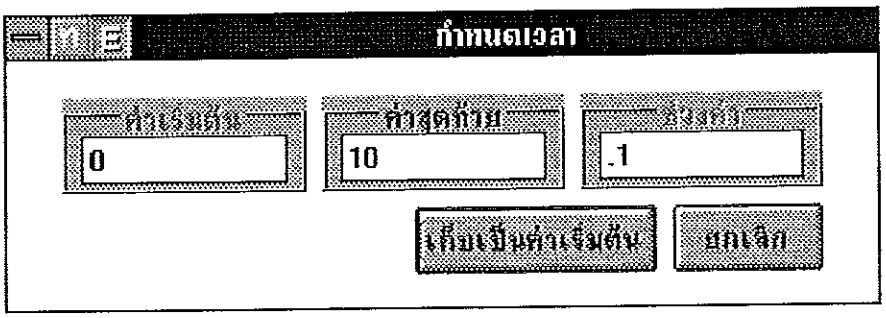
4.2. กราฟทางเดินของราก

เมื่อเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรูปแบบของกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงผลลัพธ์ บนกราฟ ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงหน้าจอของกราฟทางเดินของราก

เมื่อกำหนดช่วงเวลาในการแสดงกราฟ ให้เลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรายละเอียด ดังภาพประกอบ 36

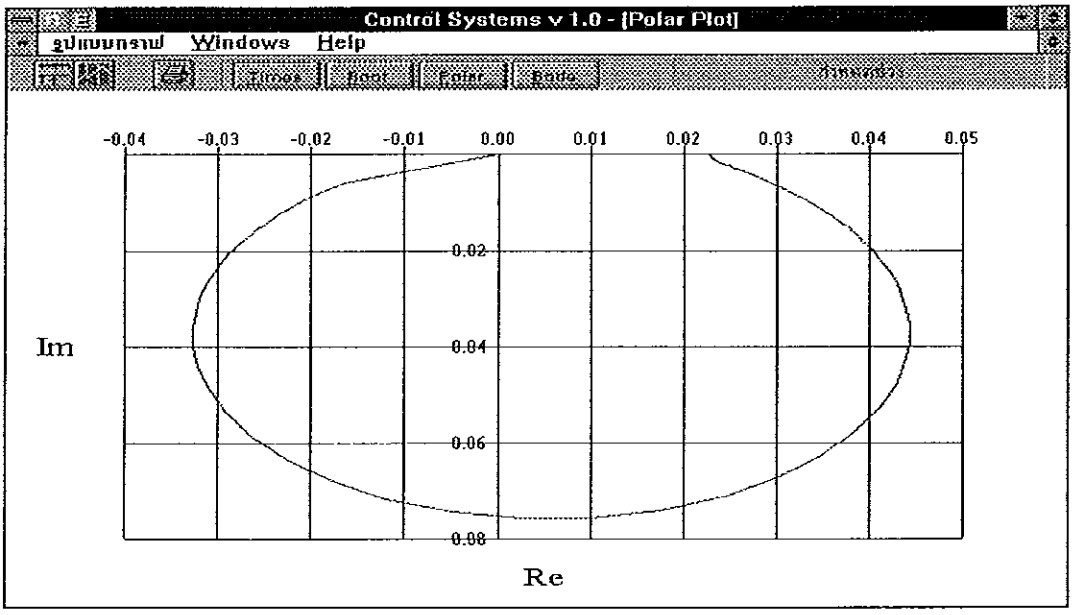


ภาพประกอบ 36 แสดงหน้าจอกำหนดช่วงค่า K ของกราฟทางเดินของราก

เมื่อทำการเพิ่มข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกปุ่ม ก็จะกลับไปสู่หน้าจอ การแสดงผลลัพธ์บนกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม อีกครั้ง ก็จะได้รูปแบบของกราฟตามที่ต้องการ

4.3. กราฟโพลาร์

เมื่อเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรูปแบบของกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงผลลัพธ์บนกราฟ ดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 แสดงหน้าจอของกราฟโพลาร์

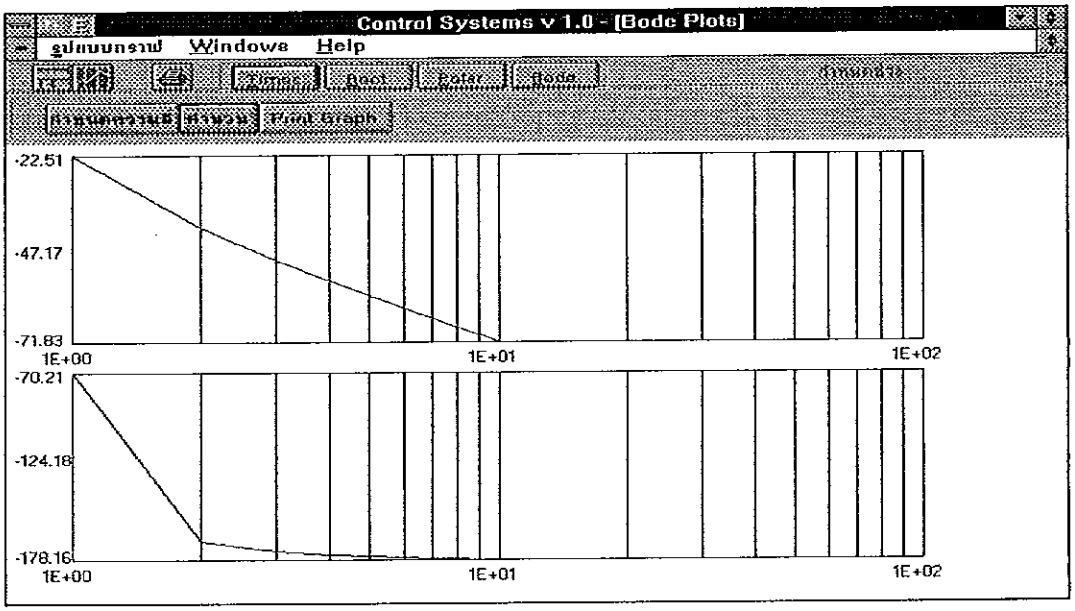
เมื่อกำหนดช่วงเวลาในการแสดงกราฟ ให้เลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรายละเอียด ดังรูป

ภาพประกอบ 38 แสดงหน้าจอกำหนดความถี่ของกราฟโพลาร์

เมื่อทำการเพิ่มข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกปุ่ม ก็จะกลับไปสู่หน้าจอการแสดงผลลัพธ์บนกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม อีกครั้ง ก็จะได้รูปแบบของกราฟตามที่ต้องการ

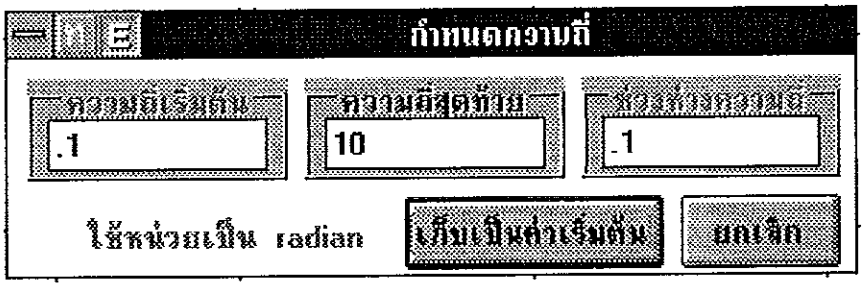
4.4. กราฟโบเด

เมื่อเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรูปแบบของกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงผลลัพธ์บนกราฟ ดังรูป



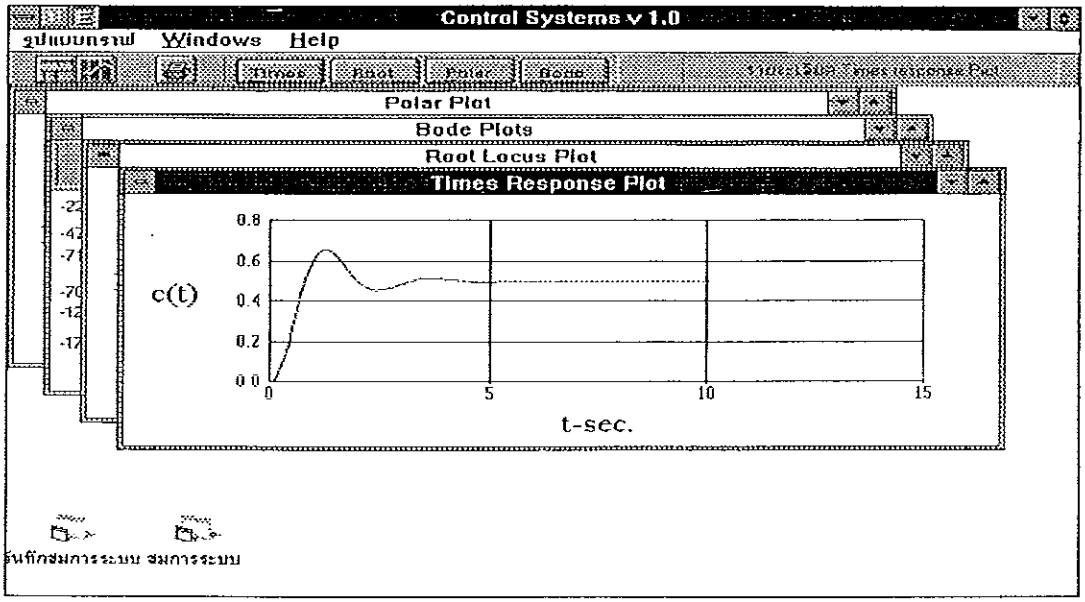
ภาพประกอบ 39 แสดงหน้าจอกราฟโบเด

เมื่อกำหนดช่วงเวลาในการแสดงกราฟ ให้เลือกปุ่ม หน้าจอจะแสดงรายละเอียดดังรูป

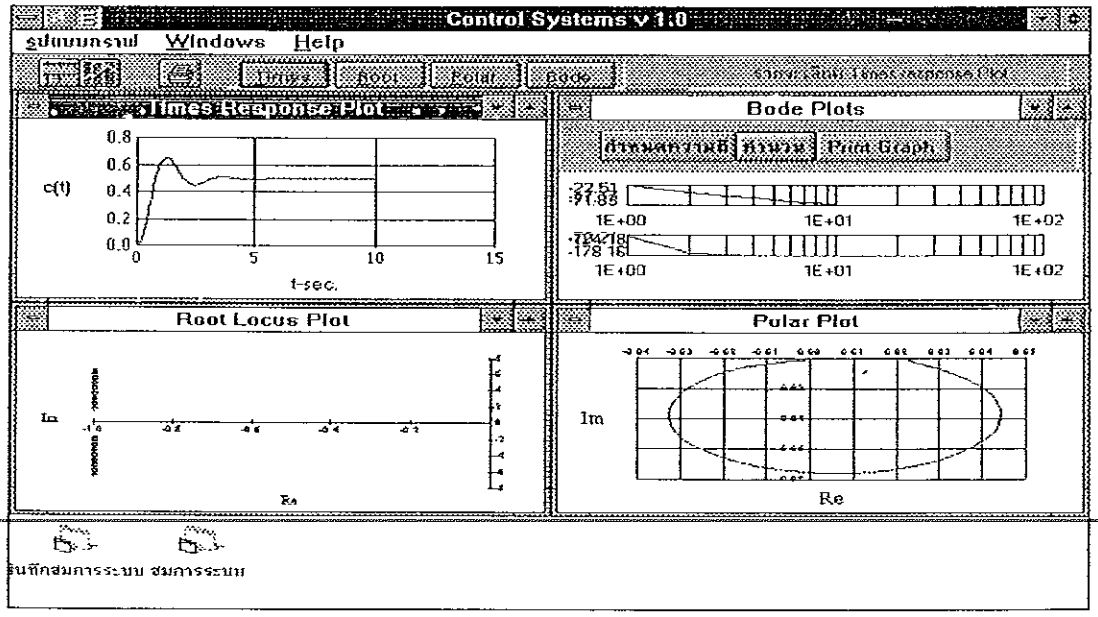


ภาพประกอบ 40 แสดงหน้าจอกำหนดความถี่ของกราฟโบเด

เมื่อทำการเพิ่มข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกปุ่ม ก็จะกลับไปสู่หน้าจอ การแสดงผลลัพธ์บนกราฟ แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม อีกครั้ง ก็จะได้รูปแบบของกราฟตามที่ต้องการ



ภาพประกอบ 41 แสดงหน้าจอการแสดงกราฟแบบ CASCADE



ภาพประกอบ 42 การแสดงกราฟแบบ TITLE

หมายเหตุ ถ้าต้องการพิมพ์กราฟออกทางเครื่องพิมพ์ ให้ผู้ใช้งานเลือกปุ่ม ก็จะได้กราฟที่พิมพ์ลงกระดาษเรียบร้อย

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ระบบที่พัฒนาขึ้นมาเหมาะที่จะนำมาใช้ประกอบการเรียนการสอน วิชาระบบควบคุม สามารถใช้งานบน WINDOWS ซึ่งผู้ใช้สามารถติดตั้งได้เอง มีส่วนของโปรแกรมสาธิตโดยเลือกไอคอนเพื่อให้ผู้ใช้ดูวิธีการใช้งานตามลำดับอย่างต่อเนื่องเพื่อเรียนรู้เบื้องต้น เมื่อต้องการใช้งานให้เลือก ไอคอน CONTROL SYSTEMS V 1.0 ขณะใช้งานเมื่อมีข้อสงสัย ผู้ใช้สามารถขอความช่วยเหลือโดยกด F1 (Help) ซึ่งจะมีการอธิบายการใช้งานในแต่ละจุด ความยืดหยุ่นในการติดต่อผู้ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานของ WINDOWS

ในการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ ระบบควบคุมด้วยกราฟทั้ง 4 ลักษณะ ของการวิจัยนี้ยังมีจุดที่ต้องปรับปรุงอยู่หลายประการ เช่น

1. ส่วนของการบันทึกสมการระบบ ผู้ใช้ต้องบันทึกตามรูปแบบของฐานข้อมูล โดยถูกกำหนดช่อง หลังจากนั้นจะแสดงผลเป็นสมการรูปแบบพหุนามหรือแบบตัวประกอบ
2. ส่วนของการเก็บข้อมูลสมการ จะเก็บชื่อแฟ้มข้อมูลแยกตาม D(s), K, G(s), H(s)
3. ส่วนของการแสดงกราฟ ผู้ใช้จะต้องเข้าใจคุณสมบัติของกราฟ แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะของระบบได้

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบ

เนื่องจากมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้านในการทำวิจัยครั้งนี้ จึงมีผลทำให้การวิจัยอาจจะไม่ดีเท่าที่ควร หรือไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างจริงจัง ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะสำหรับผู้ที่ต้องการพัฒนาโปรแกรมนี้ต่อไปดังนี้

1. ในการบันทึกสมการระบบ ควรจะสามารถบันทึกเป็นรูปแบบของพหุนามหรือตัวประกอบ ได้เลย โดยเข้าไปแก้ไข FrmInput ในส่วนของวัตถุ CmdDS, CmdK, CmdGps ให้สามารถบันทึกฟังก์ชันถ่ายโอนในลักษณะ เช่น

1.1 แบบพหุนาม ให้สามารถบันทึก $7s^5+s^2-s+3$

1.2 แบบตัวประกอบ ให้สามารถบันทึก $9s(s+4)(s+2-j)(s+2+j)$

2. ควรเพิ่มในส่วนของการเก็บชื่อสมการทั้งระบบพร้อมคำอธิบาย โดยรวมสมการของ D(s), K, G(s), H(s) เพื่อให้สามารถเลือกสมการทั้งระบบได้ โดยการเพิ่มวัตถุใหม่ใน FrmInput

3. ส่วนของการแสดงกราฟ ควรมีการเพิ่มเติมในการแสดงผลวิเคราะห์พื้นฐาน เพื่ออธิบายคุณสมบัติของระบบได้คือ

3.1 กราฟผลตอบสนองเชิงเวลา ควรจะสามารถแสดงค่าของ PO, Td, Tr, Ts และค่าของ Predominant time constant โดยเข้าไปเพิ่มเติมในส่วนของ FrmTime

3.2 กราฟทางเดินของราก ควรจะสามารถแสดงผลว่า ระบบนั้นเสถียรหรือไม่เสถียร และมีค่า K อย่างไรในแต่ละจุดที่ทำการพล็อต โดยเข้าไปเพิ่มเติมในส่วนของ FrmRoots

3.3 กราฟโบเด ควรจะสามารถแสดงค่าของ BW, Mp, Wp และ Wc โดยเข้าไปเพิ่มเติมในส่วนของ FrmBode

3.4 กราฟโพลาร์ ควรจะสามารถแสดงค่าของ ขนาด M, ความถี่ f และ มุม θ ของแต่ละจุดที่แสดงกราฟ โดยเข้าไปเพิ่มเติมในส่วนของ FrmPolar

โดยที่ผู้พัฒนาระบบ ควรมีความรู้พื้นฐานในส่วนของระบบควบคุมและภาษาของวิชวลเบสิก ซึ่งเป็นลักษณะวัตถุจะทำให้สามารถเข้าใจและพัฒนาต่อได้

บรรณานุกรม

วิชัย ศังขจันทรานนท์. 2519. วิศวกรรมระบบควบคุม(เชิงเส้น). กรุงเทพฯ : ไทยวัฒนาพานิช.

Alan, V. Oppenheim; Alan, S. Willsky and Ian, T. Yong. 1983. Signal and Systems. London : Prentice - Hall.

Astrom, K. J. and B. Wittenmark. 1984. Computer Controlled Systems : theory and design. London : Prentice - Hall

Bonner, Paul. 1993. Visual Basic Utilities. California : Ziff - Davis.

Charles, L. Phillips and Royce, D. Harbor. 1988. Feedback Control Systems. 2nd Edition. London : Prentice - Hall

Entsminger, Gary. 1994. Secrets of the Visual 3 Master's. 2nd Edition. Indiana : SAMS Publishing.

Golten, Jack and Verwer, Andy. 1991. Control System Design and Simulation. Singapore : McGraw - Hill.

Houpis, C. H. and G. B. Lamont. 1985. Digital Control Systems : theory, hardware, software. singapore : Mc Graw - hill.

Jennings, Roger. 1993. Access 1.1 Developer's Guide. Indiana : SAMS Publishing.

Maxwell, Taylor and Scott, Bryon. 1992. Visual Basic Super Bible. California : Waite Group.

Melvin, J. Maron. 1982. Numerical Analysis. New York : Macmillan Publishing.

Saadat, Hadi. 1993. Computational Aids in Control Systems Using MATLAB. Singapore : MC Graw - Hill.

Sinha, N. K. (Naresh Kumar). 1986. Control Systems. Japan : CBS College Publishing.

The Math Works. 1992. The Student Edition of MATLAB. London : Prentice - Hall.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายนิพนธ์ แซ่จง
วัน เดือน ปี เกิด	10 พฤษภาคม 2505

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2528

ทุนการศึกษา ทุนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตำแหน่ง	สถานที่ทำงาน	ปีที่ทำงาน
อาจารย์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2528-2532
ผู้จัดการฝ่ายซอฟท์แวร์	บริษัทเซาท์เทอร์นคอมพิวเตอร์เซ็นเตอร์จำกัด	2532-2536
ผู้จัดการทั่วไป	บริษัทบ้านซอฟท์แวร์จำกัด	2537-ปัจจุบัน