การควบคุมสมดุลของเหลวแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

Fuzzy Sliding Mode Control of Fluid Balance

ธัญภพ ศิริมาศเกษม[1*] และ ชัยยพล ธงชัยสุรัชต์กูล[2]

Thanyaphop Sirimaskasem and Chaiyapon Thongchaisuratkrul

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพ 10800 E-mail: [1]sak2watt@hotmail.com, [2]srp@kmutnb.ac.th

Abstract

This paper is designed to introduce the fuzzy sliding mode control of fluid balance for a coupled tank. Fuzzy logic controller and fuzzy sliding mode controller are designed to control fluid level of coupled tank. By using the fuzzy sliding mode controller the designer needs a mathematical model of the system. This model is used to find the sliding mode control parameters, which can reduce the fuzzy rules from 25 rules for direct fuzzy control to 5 rules for fuzzy sliding mode control. The results are showing that the fuzzy sliding mode control has better response than direct fuzzy control.

Keyword: *Fuzzy Control, Fuzzy Sliding Mode Control, State Space*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมสมดุลของเหลวถังคู่แบบฟัซซี่สไดล์ดิงโหมด การควบคุมแบบฟัซซี่และแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมดถูกออกแบบสำหรับควบคุมระดับของเหลวของถังคู่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม โดยหาค่าตัวแปรสำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี่และแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด จากการออกแบบทำให้จำนวนของกฎของฟัซซี่ลดลงจาก 25 กฎสำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี่ เป็น 3 กฎสำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด และจากผลการทดลองเมื่อระบบได้รับค่าเป้าหมายที่กำหนด พบว่าระบบควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมดสามารถควบคุมระดับของเหลวถังคู่ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและมีผลตอบสนองทางเวลาดีกว่าการควบคุมแบบฟัซซี่

คำสำคัญ: *การควบคุมแบบฟัซซี่, การควบคุมแบบฟัซซี่สไลดดิงโหมด, ปริภูมิสถานะ*

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ มีการพัฒนาและเจริญก้าวหน้ามากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะในงานภาคส่วนอุตสาหกรรม ได้มีการนำเทคโนโลยีควบคุมอัตโนมัติสมัยใหม่มาใช้ควบคุมเครื่องมือเครื่องจักรต่างๆมากมาย ซึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้นั้นมีความรวดเร็ว ,ความแม่นยำ, เสถียรภาพ และ สมรรถนะสูงมากขึ้นตามลำดับ เพื่อรองรับความเจริญเติบโตทางภาคอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง โรงงานอุตสาหกรรม

หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอัตโนมัติส่วนใหญ่ ให้ความสำคัญ และ มีการคิดค้น พัฒนา รูปแบบการควบคุมอัตโนมัติต่างๆ มากมาย เพื่อการควบคุมและรองรับงานตามแต่ละประเภท และ การนำไปใช้งานต่างๆ

ระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Control System) จัดได้ว่าเป็นการควบคุมที่อาศัยการคิดหรือแนวทางการทำงานตามความคิดของมนุษย์ การวิเคราะห์ฟัซซี่เป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ที่มีความใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับภาษามนุษย์มาก โดยสามารถระบุความใกล้เคียงหรือความหลากหลายได้มากกว่า คำว่า "ใช่หรือไม่ใช่" "ถูก หรือ ผิด" "ร้อน หรือ เย็น" เป็นต้น กล่าวคือ จะมีความกลมกลืนและเป็นธรรมชาติมากกว่า ซึ่งเป็นลักษณะของภาษามนุษย์ที่ มักจะใช้ คำว่าค่อยๆ เล็กน้อย หรือเกือบ เป็นต้น การควบคุมแบบฟัซซี่มีความแตกต่างการควบคุมแบบทั่วๆไป ซึ่งการควบคุมแบบฟัซซี่ สามารถนำไปใช้ควบคุมระบบที่ยากต่อการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ(System Models) ได้ดีกว่าและสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกรณีต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลง ในรูปแบบที่แตกต่างกันไป เหมือนการบันทึกประสบการณ์ที่เคยผ่านมา แต่การสร้างเงื่อนไขหรือกฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) อาจจะยากลำบากได้ขึ้นอยู่กับความชำนาญ และ ผู้เชี่ยวชาญ (Expert)ของระบบ

การควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด(Sliding Mode Control) เป็นการควบคุมที่สามารถนำมาใช้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Systems)ได้ ดั้งนั้นหากระบบที่ถูกควบคุมนั้นหาแบบจำลองได้ก็สามารถใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ร่วมกับสไลด์ดิงโหมดได้ ซึ่งเรียกว่าการควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด (Fuzzy Sliding Mode Control)

ดั้งนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบควบคุมสมดุลของเหลว ด้วยวิธีการแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมดเพื่อให้ระบบที่ถูกควบคุมนั้นลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างเหมาะสมและมีเสถียรภาพมากขึ้น เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงขึ้นในการทำงาน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาแบบจำลองของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น
2. ศึกษาและจำลองวิธีการควบคุมระบบสมดุลของเหลวแบบฟัซซี่
3. เพื่อศึกษาและจำลองวิธีการควบคุมระบบสมดุลของเหลวแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด
4. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมระบบแบบฟัซซี่ กับ ฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

แนวคิด ทฤษฎี กรอบแนวคิด

การควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Mode Control)จัดได้ว่าเป็นการควบคุมที่อาศัยการคิดหรือแนวทางการทำงานตามความคิดของมนุษย์ การวิเคราะห์ฟัซซี่เป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ที่มีความใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับภาษามนุษย์มาก โดยสามารถระบุความใกล้เคียงหรือความหลากหลายได้มากกว่า คำว่า "ใช่ หรือ ไม่ใช่" "ถูก หรือ ผิด" "ร้อน หรือ เย็น" เป็นต้น กล่าวคือ จะมีความกลมกลืนและเป็นธรรมชาติมากกว่า ซึ่งเป็นลักษณะของภาษามนุษย์ที่ มักจะใช้ คำว่าค่อยๆ เล็กน้อย หรือเกือบ เป็นต้น การควบคุมแบบฟัซซี่มีความแตกต่างจากการควบคุมแบบทั่วๆไป ซึ่งการควบคุมแบบฟัซซี่ สามารถนำไปใช้ควบคุมระบบที่ยากต่อการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้

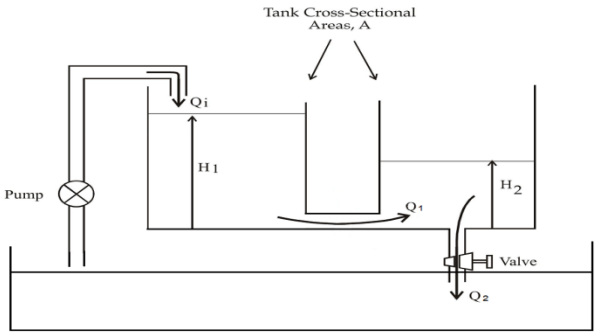
การควบคุมแบบสไลด์ดิง (Sliding Mode Control, SMC) คือ การควบคุมตัวสถานะของค่าผิดพลาดให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิง (Sliding Plane) เมื่อตัวสถานะเข้าสู่ระนาบสไลด์ดิง และควบคุมให้เคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลด์ดิงในทิศทางการลู่เข้าสู่ศูนย์ การควบคุมแบบสไลด์ดิงจะลดคาบเกี่ยวที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear coupling) ของข้อต่อให้หมดไปในช่วงการทำงานแบบสไลด์ดิงโหมด นั่นคือระบบที่ควบคุมด้วยวิธีการนี้มีความคงทน (Robustness) และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าพารามิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงโหลด และสัญญาณรบกวนต่างๆ จากภายนอก

การควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด(Fuzzy Sliding Mode Control) เป็นการนำวิธีการควบคุมระบบแบบฟัซซี่ และ สไลด์ดิง มาใช้ร่วมกัน กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Systems) ช่วยให้เวลาการลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายน้อย และ ลดจำนวนกฎของฟัซซี่ลง

วิธีดำเนินการ

1. คำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. ออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่
3. ออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด
4. เปรียบเทียบผลการทดลอง

คำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบถังของเหลวคู่

สมการปริภูมสถานะ (State Space)

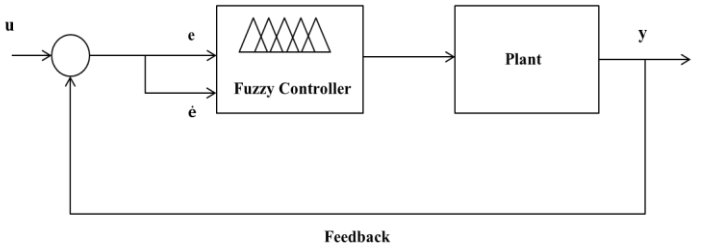
$$X = A\dot{X} + BU$$

$$Y = C^{T}X + DU$$

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{A} & \frac{K_1}{A} \\ \frac{K_1}{A} & -\frac{(K_1 - K_2)}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} q_i$$

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.05894 & 0.05894 \\ 0.05894 & 0.08790 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.03537 \\ 0 \end{bmatrix} q_i$$

ออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่



ภาพบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟัซซี่

การหาสมการระบบควบควมแบบฟัซซี่

- Fuzzification แปลงคลิปเซตอินพุตเป็นฟัซซี่เซต
- Rule Base Inference ประมวลฐานกฎของอินพุตเป็นเอาท์พุต
- Defuzzification แปลงฟัซซี่เซตเป็นคลิปเซตเอาท์พุต

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i}$$

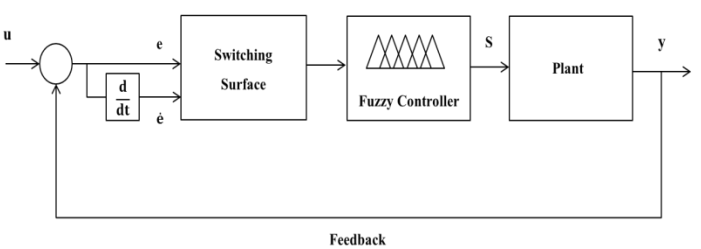
COG = ค่าจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity)

N = ตำแหน่งที่ 1 ถึง i

α_i = ฟัซซี่เอาต์พุตในเซตฟัซซี่ ที่ i

w_i = พื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซี่ตำแหน่งที่ i

ออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด



ภาพบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

การหาสมการระบบควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

ขั้นที่1 กำหนดผิวหน้าสไลด์ดิง(Sliding Surface) โดยใช้เทคนิค LQR หาค่าเกนป้อนกลับ หรือ K ค่าผิดพลาด(E) เกิดจาก ค่าที่ต้องการ (Xr) ลบค่าที่เกิดขึ้นจริง (X); E=Xr-X

$$S = CE \tag{1}$$

เมื่อ C เป็นเมทริก (r × n) ซึ่งถูกเลือกมาที่ทำให้ S =0 ซึ่งเป็นตัวควบคุมระบบไดนามิคแบบคงที่ ซึ่งมีลำดับลดลง

ขั้นที่2 กำหนดค่า ฟังก์ชั่นบวกแน่นอน ของ S, K(S) ที่ทำให้

$$-S^T(CAX + CBK) < 0 \tag{2}$$

ขั้นที่ 3 กำหนด ฐานกฎฟัซซี่ (fuzzy rule base) เพื่อทำการแปลงค่า G ให้เป็นค่า K(S) ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถสร้างฟังค์ชั่นทั่วไปใดๆ ที่มีขนาดโดยสุ่ม ความแม่นยำที่กำหนดให้มีระดับการฟัซซี่ฟิเคชั่นที่เพียงพอ ดังนั้นองค์ประกอบของ K(S) สามารถถูกประมาณค่าได้โดยใช้ระดับการฟัซซี่ฟิเคชั่น m เมื่อ m ถูกเลือกมาอย่างเสรีโดยผู้ออกแบบ เนื่องจาก K(S) มีองค์ประกอบจำนวน r องค์ประกอบ(1องค์ประกอบต่อ 1 ค่าด้านเข้า) ดังนั้นจึงได้ผลเป็นค่าของ Fuzzy rule เท่ากับ rm

ขั้นที่4 กำหนดให้ U เป็นค่าของ defuzzified value ของ (s) หลากหลายทางเลือกในการเลือก K(S) ส่งผลเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซี่หลากหลายแบบที่แตกต่างกัน เช่น CB ถูกกำหนดที่ทำให้ CB>I>0 ดังนั้นความแน่นอนได้รับการรับรองจากการเลือก K(S) ซึ่ง

$$K(S) = \gamma I.\mathrm{sign}(S) \tag{3}$$

เมื่อ I เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ (r × r) หนึ่ง และ γ เป็นค่าคงที่ค่าบวกค่าหนึ่งที่เลือกมาที่ทำให้ $\gamma\varepsilon$ มีค่ามากกว่า CAX

$$\gamma I > \max(|CAX|) \tag{4}$$

จากสมการที่ (4) ได้ผลเป็นตัวควบคุมสไลด์ดิงในแบบฟัซซี่ ซึ่งถูกเรียกว่า การควบคุมฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด (Fuzzy sliding Mode Control : FSMC) ในอีกวิธีหนึ่งสำหรับเลือก K(S) เป็น

$$K(S) = \gamma \mathrm{sat}(\beta s) \tag{5}$$

เมื่อ $\mathrm{sat}(x)$ เป็นฟังก์ชั่นแบบอิ่มตัว (Saturation function)

$$f(x) = \begin{cases} -1, & x > 0 \\ x, & -1 < x < 1 \\ -1, & x < 1 \end{cases} \tag{6}$$

เมื่อ γ , β เป็นสเกลาร์บวกที่เลือกมาซึ่งทำให้

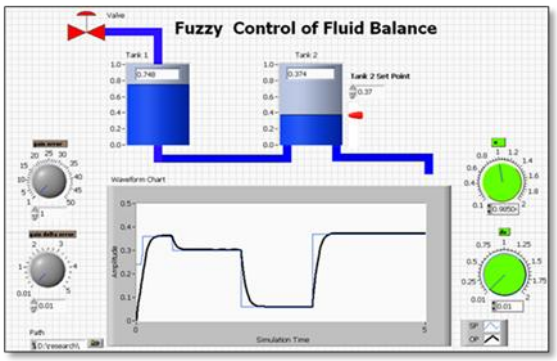
$$\gamma, \beta = \begin{cases} \gamma\beta \max(|CAX|), & |\beta S| > 1 \\ (A - \gamma\beta BC) < 0, & |\beta S| > 1 \end{cases} \tag{7}$$

จากสมการที่ (7) ได้ผลเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซี่แบบอิ่มตัวซึ่งถูกเรียกว่าตัวควบคุมฟัซซี่แบบอิ่มตัว (Fuzzy saturating controller : FSC) และอีกวิธีหนึ่ง เลือก K(S) เป็น

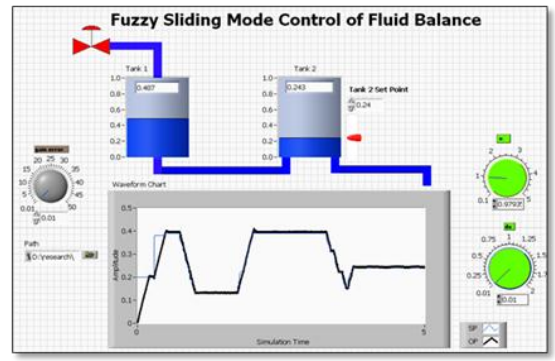
$$K(S) = \gamma . \tanh(\beta s) \qquad (8)$$

เมื่อ γ, β, มีค่าตามที่กำหนดในสมการที่ (8) มีผลทำให้ได้ตัวควบคุมแบบ tanh ในแบบฟัซซี่ ขั้นที่ 5 แทนตัวแปรทั้งหมด ในระบบควบคุมนั้น และนำผลที่ได้มาจากการทดลอง

ผลดำเนินการ



การควบคุมแบบฟัซซี่



การควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

ระดับของเหลว (Level)	เกนผิดพลาด (Gain Error)	เวลาไต่ขึ้น (Rise Time)	เวลาคงตัว (Setting Time)	%Over	ค่าผิดพลาด	
					Error	%Error
10.8 cm	0.5	0.8	0.90	0%	0	0%
หรือ	1	0.6	0.68	0%	0	0%
(300 ml)	2	0.3	0.35	0%	0	0%
18 cm	0.5	0.8	0.90	0%	0	0%
หรือ	1	0.6	0.68	0%	0	0%
(500 ml)	2	0.3	0.35	0%	0	0%

ผลกราฟการควบคุมแบบฟัซซี่

ระดับของเหลว (Level)	เกนผิดพลาด (Gain Error)	เวลาไต่ขึ้น (Rise Time)	เวลาคงตัว (Setting Time)	%Over	ค่าผิดพลาด	
					Error	%Error
10.8 cm	0.5	0.2	0.23	0%	0	0%
หรือ	1	0.2	0.23	0%	0	0%
(300 ml)	2	0.2	0.23	0%	0	0%
18 cm	0.5	0.2	0.23	0%	0	0%
หรือ	1	0.2	0.23	0%	0	0%
(500 ml)	2	0.2	0.23	0%	0	0%

ผลกราฟการควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด

การอภิปรายผล

การควบคุมสมดุลของเหลวด้วยวิธีการฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด มีความรวดเร็วในการเข้าสู่ค่าเป้าหมายดีกว่าการควบคุมแบบฟัซซี่ ใช้เวลาการไต่ขึ้นน้อยกว่า มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงหรือการรบกวนได้ดีกว่า การควบคุมทั้งสองแบบมีความแม่นยำในการทำงานใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบจากค่าผิดพลาดป้อนกลับ การควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมด ใช้กฎฟัซซี่ น้อยกว่าการควบคุมแบบฟัซซี่ ดังนั้นการควบคุมแบบฟัซซี่สไลด์ดิงโหมดจึงเป็นวิธีการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพ มีความคงทนต่อการรบกวนและมีความแม่นยำสูง สามารถนำไปประยุกต์และปรับปรุงเพื่อต่อยอดการใช้ในงานอุตสาหกรรม หรือ งานทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อื่นๆ ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. การอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับจากตัวเซนเซอร์บางครั้งมีการแกว่งจากระดับน้ำที่เกิดจากการเปิดวาล์วมากเกินไป
2. ปั๊มน้ำที่นำมาใช้ควรคำนึงถึงอัตราการไหลที่สัมพันธ์กับการไหลเข้าและออกของถังน้ำทั้งสองใบ
3. บทความนี้สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบอื่นที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้

เอกสารอ้างอิง

1. พยุง มีสัจ. Fuzzy Logic. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพ. ม.ป.ป.
2. ทวิช จิตรสมบูรณ์. Fluid Mechanics กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล, 2553
3. S. Thongchai and S. Panarit .Fuzzy Sliding Mode Controller Design. The Journal of King Mongkut' s Institute of Technology North Bangkok. Vol. 14,No.1,pp.6-15,(Jan-Mar),2004
4. S.Thongchai. Fuzzy Sliding Mode Control and It Applications. Proceeding of the 26th Conference of Electrical Engineering,(EECON'26), Chauum,Petburi,Thailand November, 2003
5. U.Itkis. Control System of Variable Structure. New York. Wile 1976
6. L.A. Zadeh. "Fuzzy sets". Information and Control, 8(1965):338-353
7. Palm, Rainer, Dimiter Driankov and Hans Hellendoom. Model Based Fuzzy Control. Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers. Springer-Verlag Berlin, USA,1997.
8. U.Itkis. Control Systems of Variable Structure. New York. Wiley 1976
9. V.I.Utkin. J.Guldner; and J. Shi. Sliding Mode Control in Electromechanical System London , 1999.
4. L.A. Zadeh. "Fuzzy sets". Information and Control, 8(1965):338-353