ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมแมทแลป/ซิมมูลิงค์

The Experiment Set for Temperature Control Using MATLAB/Simulink Program

ประเสริฐ แป้นหยูรัตน์[1], วินัย เศรษฐโชตินันท์[2], ปิจิราวุช เวียงจันดา[2,*]

[1] กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ 204 ถนนสุขุมวิท ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
[2] กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ 204 ถนนสุขุมวิท ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
*ติดต่อ: Pijirawich.w@navy.mi.th, 0–2475–3864

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิในห้องปิดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยระบบที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ประกอบไปด้วย ห้องปิด (Chamber) ที่ภายในติดตั้งฮีทเตอร์กำเนิดความร้อน ระบบจะควบคุมอุณหภูมิด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายความร้อนผ่านทางอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า และใช้ LM35 เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ช่วงของอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้อยู่ระหว่าง 25 – 80 องศาเซลเซียส สำหรับการควบคุมใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับ เทคนิคแบบฮาร์ดแวร์ในวงลูป (Hardware–in–the–Loop) โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4Discovery ในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลอง ชุดฝึกนี้สามารถตอบสนองการใช้งาน ในเรื่องของการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งได้อย่างครบถ้วน ซึ่งนักศึกษาจะได้ทดลองและทำความเข้าใจถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วิธี Ziegler-Nichols นอกจากนั้นยังเป็นชุดฝึกที่สามารถสร้างและใช้งานได้ง่ายด้วย

คำหลัก: ตัวควบคุมแบบพีไอดี, เทคนิคแบบฮาร์ดแวร์ในวงลูป, ระบบควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

This objective of the paper is to introduce the experiment set for temperature control in the chamber using MATLAB/Simulink program. The process is composed of a heater installed in the chamber. The temperature is controlled by supplying voltage via voltage controller to the cooling fan. The temperature sensor is an IC LM35 which is installed in the chamber to detect the internal temperature. The working temperature range of LM35 is within 25 – 80 degree Celsius. The control system is using MATLAB/Simulink program together with Hardware–in–the–Loop (HIL) technique. The PID controller is used to test the system response. The interface between controller and process is operated by STM32F4Discovery microcontroller. The experiment set can meet the criteria of controlling for the first order equation. Students will experiment and understand how to find both mathematical models and PID components by Ziegler-Nichols method. Finally, the experiment set is easy to build and use.

Keywords: Proportional – Integrated – Derivative (PID), Hardware–in–the–Loop (HIL), Temperature control.

1. บทนำ

ในการเรียนวิชาวิศวกรรมระบบควบคุมอัตโนมัติ การศึกษาทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงเป็นสิ่งที่จำเป็น และมีความยากของการศึกษา ทำให้ผู้เรียนเข้าใจได้ยาก และเกิดความเบื่อหน่ายในการเรียนทำให้การเรียนไม่สัมฤทธิ์ผลตามที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะต้องเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ทดลองนำความรู้จากทฤษฎีมาใช้ปฏิบัติจริง โดยจะพบว่าชุดทดลองในปัจจุบันจะมีอยู่สองลักษณะ คือ ชุดทดลองระบบควบคุมกระบวนการด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ และชุดทดลองระบบควบคุมกระบวนการที่เป็นฮาร์ดแวร์ซึ่งจำลองมาจากกระบวนการในอุตสาหกรรม ชุดทดลองระบบควบคุมกระบวนการด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์มีข้อดี คือ สะดวกและรวดเร็ว แต่มีข้อเสีย คือ ผู้เรียนมองไม่เห็นภาพในทางปฏิบัติได้ชัดเจน ส่วนชุดทดลองระบบควบคุมกระบวนการที่เป็นฮาร์ดแวร์ซึ่งจำลองมาจากกระบวนการในอุตสาหกรรม มีข้อดีคือผู้เรียนมองเห็นภาพในเชิงปฏิบัติแต่มีข้อเสียตรงที่รูปแบบการทดลองไม่ยืดหยุ่นเพราะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ ดังนั้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของชุดทดลองในปัจจุบันงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการของระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในวงลูป (Hardware–in–the–Loop) มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาต้นแบบชุดทดลองกระบวนการในการควบคุมแบบเวลาจริง โดยระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในวงลูปจะจำลองการทำงานของชิ้นส่วนบางชิ้นหรือทั้งหมดของกระบวนการด้วยซอฟแวร์ แต่ส่วนที่เป็นสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาท์พุท ของกระบวนการ เช่น สัญญาณจากเซนเซอร์ต่าง ๆ จะเป็นสัญญาณที่สร้างขึ้นมาจากการ์ดประมวลผลข้อมูล (Data Acquisition Card) ซึ่งสามารถใช้เครื่องมือวัดทำการตรวจวัดสัญญาณได้

ระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในวงลูปได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและ ทดสอบ ระบบควบคุมในอุตสาหกรรม เพื่อลดเวลา ลดความผิดพลาด และ ลดต้นทุนการผลิต [1–3] ในส่วนทางด้านการศึกษานั้นก็ได้เริ่มมีการนำระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในวงลูปมาใช้ช่วยในการเรียนการสอนเช่นกัน [4–5]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอการทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปิด โดยใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ และโปรแกรมสำเร็จรูป Waijung Blockset ซึ่งเป็น Toolbox ใน MATLAB

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมอุณภูมิตามที่แสดงในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดลองและโปรแกรม ส่วนในหัวข้อที่ 4 และ 5 เป็นผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง ตามลำดับ

2. สมการทางคณิตศาสตร์

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องปิด (Mathematical Model of the Chamber)

พิจารณาอัตราการไหลมวลของอากาศ $\dot{m}$ (kg/m^3) ที่ไหลผ่านห้องปิด ณ อุณหภูมิใด ๆ θ_1 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน คือ

$$\frac{dq}{dt} = \dot{m}c\frac{d\theta_1}{dt} \quad C\frac{d\theta_1}{dt} \tag{1}$$

โดยที่

c คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศภายในห้องปิด

$C = \dot{m}c$ คือ thermal capacitance (จูลต่อเคลวิน)

กำหนดให้ $\varnothing = C\frac{d\theta_1}{dt}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่มวลของอากาศ

สามารถคำนวนหาอัตราการกำเนิดความร้อนภายในห้องปิด จะได้

$$\varnothing = \frac{\theta_2 - \theta_1}{R} \tag{2}$$

โดยที่

θ_2 คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

R คือ Thermal resistance (เคลวินต่อวัตต์)

จากสมการที่ (2) จะได้

$$C\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{R} \tag{3}$$

จัดรูปสมการที่ (3) จะได้

$$\frac{d\theta_1}{dt}+\frac{\theta_1}{RC}=\frac{\theta_2}{RC} \quad (4)$$

กำหนดให้ $\tau = RC$ จากสมการที่ (4) จะได้

$$\frac{d\theta_1}{dt}+\frac{\theta_1}{\tau}=\frac{\theta_2}{\tau} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) ทำการแปลงฟังก์ชั่นในโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ จะได้

$$\theta_1(\tau s+1)=\theta_2 \quad (6)$$

แปลงให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชั่นถ่ายโอน จะได้

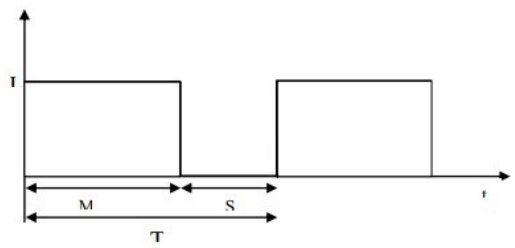
$$\frac{\theta_1}{\theta_2}=\frac{1}{(\tau s+1)} \quad (7)$$

เมื่อ τ คือ time constant ของระบบ
สมการที่ (7) คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องปิด พบว่า เป็นระบบอันดับที่หนึ่ง (First – Order System)

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพัดลมระบายความร้อน (Mathematical Model of the Fan)

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้า (Applied Voltage) และอัตราการไหลของมวลผ่านพัดลมระบายความร้อนมีลักษณะเป็นเชิงเส้น พัดลมระบายความร้อนถูกขับโดย MOSFET โดยการส่งสัญญาณการควบคุมแบบ PWM ดังแสดงในรูปที่ 1 จะได้

$$I_{rms}=I_0\sqrt{\frac{M}{T}} \quad (8)$$



รูปที่ 1 PWM Fan Waveform

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้อุณหภูมิ (Mathematical Model of the Temperature Sensor, LM35)

ตัวรับรู้อุณหภูมิแบบวงจรรวม (Integrated circuit) เบอร์ LM35 มีอัตราการขยาย $10\,mV/°C$ มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\frac{V_0}{T}=0.01 \quad (9)$$

โดยที่

V_0 คือ สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากตัวรับรู้อุณหภูมิ

T คือ อุณหภูมิที่วัดได้

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม (Mathematical Model of the Controller)

ในบทความนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional – Integral – Derivative, PID) ในการควบคุมอุณหภูมิในห้องปิด จากรูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PID สามารถหาแบบจำลองทางคณิศาสตร์ได้ดังนี้

$$u(t)=K_p e(t)+\frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\,dt+K_p T_d\frac{d\,e(t)}{dt} \quad (10)$$

จากสมาการที่ (10) เขียนให้อยู่ในรูปของโดเมน s จะได้

$$U(s)=K_p[1+\frac{1}{T_i\,s}+T_d\,s]\,E(s) \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) เขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชั่น z จะได้

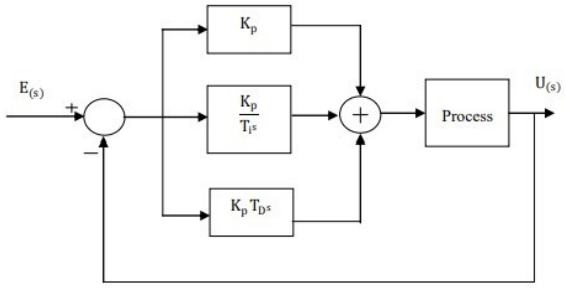
$$U(z)=K_p[1+\frac{T}{T_i\,(1-z^{-1})}+T_d\,\frac{(1-z^{-1})}{T}]\,E(z) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) เขียนให้อยู่ในฟังก์ชั่นถ่ายโอน จะได้

$$\frac{U(z)}{E(z)}=a+\frac{b}{T_i\,(1-z^{-1})}+c\,(1-z^{-1}) \quad (13)$$

โดยที่

$$a = K_p, \quad b = \frac{K_p T}{T_i}, \quad c = \frac{K_p T_d}{T} \qquad (14)$$



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอดี

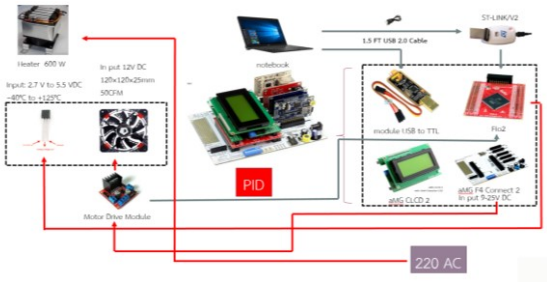
สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม จะใช้วิธีป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการซึ่งถูกแนะนำโดย Ziegler-Nichols และตารางการหาค่าพารามิเตอร์พีไอดีที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การหาค่าพีไอดีที่เหมาะสมด้วยวิธี Ziegler-Nichols

พารามิเตอร์	K_p	T_i	T_d
P	$T/(K \cdot L)$	∞	0
PI	$0.09T/(K \cdot L)$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/(K \cdot L)$	$2L$	$0.5L$

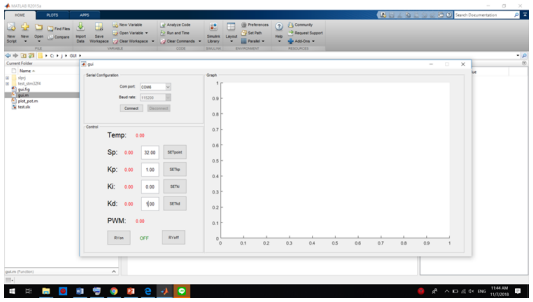
3. การออกแบบระบบควบคุมด้วย MATLAB/Simulink

ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วยห้องปิดขนาดปริมาตร 3,000 cm^3 ควบคุมการทำงานด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายความร้อนขนาด 250 วัตต์ ผ่าน MOSFET ที่มีสัญญาณแบบ PWM ภายในห้องปิดมีแหล่งกำเนิดความร้อนแบบฮีทเตอร์ขนาด 600 วัตต์ และการตรวจวัดอุณหภูมิใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด LM35 เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องปิดที่เปลี่ยนแปลงไป ช่วงของอุณหภูมิภายในเตาอบที่ใช้ในการทดลองมีช่วงระหว่าง 25 – 80 องศาเซลเซียส อุปกรณ์แปลงสัญญาณรับค่าจาก LM35 เพื่อแปลงสัญญาณอุณหภูมิที่วัดได้ให้อยู่ในช่วง 0 – 3.3 โวลต์ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิห้องปิดกระทำบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับเทคนิคแบบฮาร์ดแวร์ภายในวงลูป (Hardware–in–the–Loop) และใช้ตัวควบคุมพีไอดี โดยสัญญาณควบคุมขนาด 0 – 3.3 โวลต์ เพื่อส่งต่อให้กับอุปกรณ์ควบคุมโวลต์ ซึ่งการรับและส่งสัญญาณ ระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลองใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F4DIscovery ในการรับและส่งสัญญาณ ระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลอง ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงระบบควบคุมกระบวนการเตาอบที่ใช้ในการทดลอง

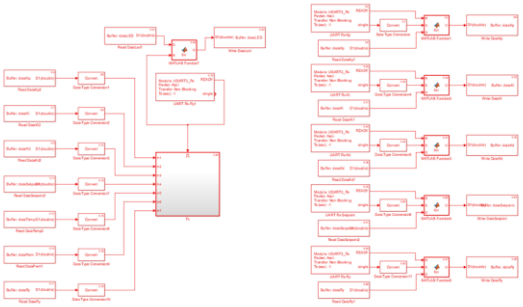


รูปที่ 3 ไดอะแกรมของชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4 ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 แสดงหน้าจอของโปรแกรมในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 6 แสดงโปรแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิด้วย MATLAB/Simulink

4. ผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วิธี Ziegler-Nichol

4.1 การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

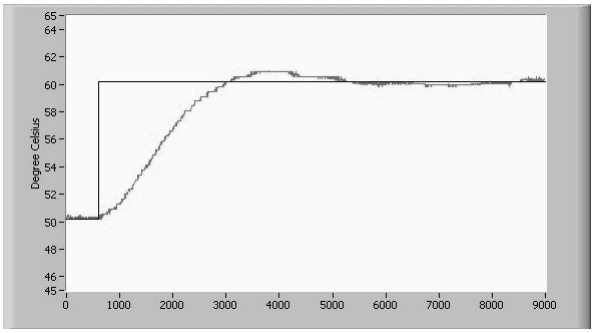
ในการทดลองนี้ทำการทดลองในห้องที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเลือกจุดทำงาน ณ ตำแหน่งที่อุณหภูมิของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีในการทดลอง

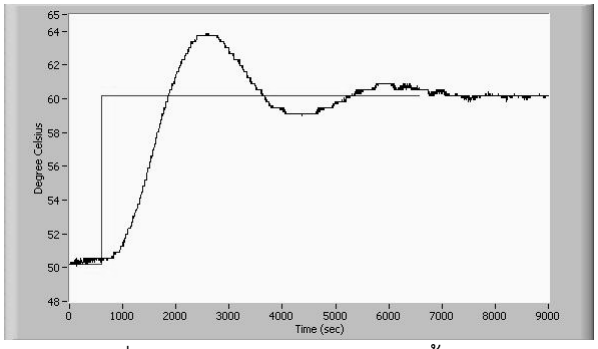
พารามิเตอร์	K_p	T_i	T_d
P	0.223	∞	0
PI	0.167	5.556	0
PID	0.45	2.894	0.745

4.2 การควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วิธี Ziegler-Nichols

รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิของตัวควบคุมพีไอและพีไอดี เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเปลี่ยนแปลงไป 10 องศาเซลเซียส ในสภาวะมีโหลด 200 วัตต์จากฮีตเตอร์ จากรูปพบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีไอและ พีไอดีมีค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot) 7 เปอร์เซ็นต์ และ 35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าเวลาเข้าที่ (Settling Time) ประมาณ 6,000 วินาที และ 6,500 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได
ของตัวควบคุมพีไอดี

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอ ชุดทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปิดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับเทคนิคแบบฮาร์ดแวร์ภายในวงลูป (Hardware–in–the–Loop) โดยชุดฝึกนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้สำหรับการเรียนการสอนในวิชาระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งกระบวนการที่นำเสนอนี้เป็นกระบวนการที่ สามารถใช้เรียนรู้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับการหาฟังก์ชันถ่ายโอนและการควบคุมกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่ไร้เวลาผลตอบสนองได้เป็นอย่างดี จากการทดลองใช้งานชุดทดลอง นักเรียนนายเรือมีความสนใจในการทดลองเนื่องจากโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมที่มีลักษณะง่ายต่อการเขียนโปรแกรมในการควบคุม และสามารถแสดงผลตอบสนองของกระบวนการได้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Isermann, R., Schaffnit, J. and Sinsel, S. (1999). Hardware–in–the–loop simulation for design and testing of engine-control systems, Control Engineering Practice, vol.7(5), May 1999, pp.643-653.

[2] Linjama, M., Virvalo, T., Gustafsson, J., Lintula, J., Aaltonen, V. and Kivikoski, M. (2000). Hardware–in– the–loop environment for servo controller design, tuning and testing, Microprocessors and Microsystems, vol.24, March 2000, pp.13-21.

[3] Hagiwara, K., Terayama S., Takeda Y., Yoda K., and Suzuki S., (2002). Development of automatic transmission control system using hardware-in-the-loop simulation system, JSAE Review, January 2002, vol.23, pp.55-59.

[4] Panayiotis S., and Piyabongkarn D., (2003). Development of a Real-Time Digital Control System with a Hardware-in-the-Loop magnetic Levitation Device for Reinforcement of Controls Education, IEEE Trans. On Education, February 2003, vol.46(46), pp.79-87.

[5] Grega W., (1999). Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education, The 29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, San Juan, Puerto Rico.