

# XÂY DỰNG THÍ NGHIỆM ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH VỚI CHI PHÍ THẤP

Huỳnh Thái Hoàng, Nguyễn Vĩnh Hảo

Khoa Điện – Điện Tử, Trường ĐH Bách Khoa –ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 05 tháng 01 năm 2004, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 09 tháng 3 năm 2004)

**TÓM TẮT:** Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế và thi công mô hình phần cứng và chương trình phần mềm phục vụ giảng dạy thí nghiệm điều khiển thông minh. Phần cứng giao tiếp với máy tính dùng card thu thập số liệu PCL-818L (Advantech), phần mềm viết trên nền C++ Builder nên các bài thí nghiệm hoàn toàn tương thích với Matlab/Simulink, Real-Time Workshop và các bộ công cụ liên quan đến điều khiển. Chi phí xây dựng các bài thí nghiệm trên chỉ khoảng 1/3 so với thiết bị thí nghiệm có tính năng tương tự của nước ngoài mà chất lượng gần như tương đương.

## 1. GIỚI THIỆU

Điều khiển thông minh (ĐKTM) là phương pháp điều khiển bất chước/phỏng theo khả năng điều khiển thông minh của con người. Khác biệt cơ bản của các phương pháp ĐKTM so với các phương pháp điều khiển thông thường (conventional control) là khi thiết kế hệ thống không cần thiết phải biết mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Vì vậy ĐKTM đặc biệt phù hợp để thiết kế các hệ thống điều khiển phức tạp, phi tuyến. Các kỹ thuật ĐKTM được đề cập đến nhiều nhất hiện nay là điều khiển mờ, mạng thần kinh nhân tạo, giải thuật di truyền và hệ chuyên gia (xem [1]). Đây là lĩnh vực nghiên cứu có nhiều triển vọng và phát triển rất mạnh trong những năm gần đây. Song song với sự hoàn thiện về lý thuyết, các ứng dụng của phương pháp ĐKTM ngày càng phong phú, các thiết bị điều khiển thương mại có tích hợp thuật toán ĐKTM ngày càng nhiều.

Nhằm theo kịp sự phát triển của lý thuyết điều khiển hiện đại, môn học Hệ Thống Điều Khiển Thông Minh đã được đưa vào chương trình đào tạo sau đại học ngành Tự Động Hóa. Tương tự như đa số các môn học khác, người học chỉ được truyền đạt lý thuyết mà không có điều kiện kiểm chứng những vấn đề đã học trên các mô hình thực tế, điều này phần nào gây khó khăn cho người học trong việc tiếp thu kiến thức mới. Để nâng cao hiệu quả và chất lượng đào tạo nhất thiết cần phải có thiết bị thí nghiệm. Trước đây để có thể xây dựng được các bài thí nghiệm về lý thuyết điều khiển nâng cao chúng ta phải đầu tư mua thiết bị thí nghiệm của nước ngoài. Thiết bị ngoại nhập có ưu điểm là phần cơ khí chế tạo chắc chắn, tin cậy; phần cứng và phần mềm chạy ổn định; hình dáng bên ngoài đẹp. Tuy nhiên do vấn đề bản quyền người sử dụng không thể chủ động được phần cứng cũng như phần mềm, điều đó gây không ít khó khăn trong việc phát triển thí nghiệm. Hơn nữa, thiết bị ngoại nhập lại có giá thành khá cao, trong điều kiện hiện nay chúng ta không đủ kinh phí để đầu tư trọn gói dẫn đến thiết bị mua sắm thường không đồng bộ, hiệu quả đầu tư chưa cao. Thực tế nêu trên cho thấy cần phải nghiên cứu chế tạo thiết bị thí nghiệm chất lượng cao, giá thành rẻ từ nguồn lực trong nước. Đã có các đề tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước về vấn đề xây dựng thí nghiệm nói chung và thí nghiệm ĐKTM nói riêng ([3], [4], [5]). Trong bài báo [5], các tác giả đề cập đến việc thiết kế và thi công thiết bị thí nghiệm điều khiển số con lắc, tuy nhiên theo như bài báo trình bày, kết quả điều khiển chỉ dừng lại mô phỏng trên máy tính, phần cứng vẫn còn tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện. Trong các công trình nghiên cứu [3], [4] các tác giả đã thành công trong việc xây dựng mô hình phần cứng điều khiển thông minh hệ thống nhiệt và hệ thống mức dựa trên PLC S7-300 của hãng Siemens. Tuy nhiên mô hình hệ thống nhiệt và hệ thống bồn chứa một đầu vào một đầu ra quá đơn giản nên không thể làm nổi bật hiệu quả của phương pháp ĐKTM so với các phương pháp điều khiển khác.



Ngoài ra theo ý kiến riêng của chúng tôi thiết bị thí nghiệm dựa vào PLC S7-300 không đủ linh hoạt để có thể áp dụng được tất cả các kỹ thuật ĐKTM đã đề cập đến ở trên.

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng thí nghiệm ĐKTM tại Bộ môn Điều Khiển Tự Động, Khoa Điện-Điện Tử, Đại học Bách Khoa TP.HCM với tiêu chí thiết bị thí nghiệm phải hoạt động tin cậy, phải rất linh hoạt trong việc thay đổi các thuật toán điều khiển và giá thành thấp. Các thiết bị thí nghiệm còn phải được chuẩn hóa sao cho học viên cao học và sinh viên có thể sử dụng như là đối tượng điều khiển chuẩn để kiểm chứng các thuật toán điều khiển hiện đại nói chung và thuật toán ĐKTM nói riêng, từng bước nâng cao trình độ tự động hóa, làm cơ sở cho việc ứng dụng lý thuyết điều khiển hiện đại vào các hệ thống thực.

Nội dung tiếp theo của bài báo như sau. Mục 2 tóm lược một số vấn đề liên quan đến thí nghiệm điều khiển thông minh, đây là cơ sở cho việc thiết kế các mô hình thí nghiệm. Mục 3 trình bày thiết kế và kết quả thi công hai mô hình thí nghiệm điển hình: hệ xe-con lắc và hệ bồn chứa liên kết. Mục 4 là kết luận và một số đề xuất nghiên cứu tiếp theo.

## 2. THÍ NGHIỆM ĐKTM VÀ ĐỊNH HƯỚNG XÂY DỰNG BÀI THÍ NGHIỆM

Thí nghiệm ĐKTM nhằm trang bị cho học viên kiến thức thực hành và nâng cao kỹ năng ứng dụng lý thuyết ĐKTM để điều khiển các mô hình thật, tiến tới điều khiển hệ thống thật. Cơ sở để xây dựng các bài thí nghiệm ĐKTM là môn học Hệ Thống Điều Khiển Thông Minh. Nội dung chính của môn học đề cập đến những vấn đề sau đây:

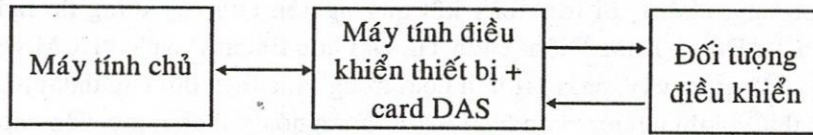
- Điều khiển mờ: điều khiển trực tiếp, điều khiển giám sát và điều khiển thích nghi.
- Mạng thần kinh nhân tạo: mạng truyền thẳng nhiều lớp, mạng hàm cơ sở xuyên tâm ứng dụng trong điều khiển, nhận dạng, dự báo.
- Hệ mờ thần kinh dùng nhận dạng và điều khiển
- Giải thuật di truyền ứng dụng trong các bài toán tự chỉnh, điều khiển thích nghi, ước lượng.
- Đánh giá tính ổn định, chất lượng của hệ thống điều khiển thông minh.
- So sánh điều khiển thông minh và điều khiển thông thường: ưu điểm và khuyết điểm.

Để thực hiện được các thí nghiệm liên quan đến các nội dung trên mô hình thí nghiệm phải được thiết kế sao cho có độ linh hoạt cao, thay đổi thuật toán điều khiển dễ dàng. Đối tượng thí nghiệm phải chọn lựa là các đối tượng điển hình, qua các thí nghiệm điều khiển các đối tượng này, học viên có thể vận dụng kiến thức đã thu được để thiết kế các bộ điều khiển cho các hệ thống khác.

Để thỏa mãn các yêu cầu vừa phân tích ở trên, tất cả các thiết bị thí nghiệm đều được thiết kế theo hướng điều khiển số dùng máy tính PC tương thích với Matlab/Simulink và Real-Time Workshop. Matlab là phần mềm tính toán kỹ thuật có thể nói là mạnh nhất hiện nay. Với bộ công cụ Simulink, Matlab cho phép mô phỏng các hệ thống điều khiển từ đơn giản đến phức tạp trên máy tính PC. Real-Time Workshop cho phép mô phỏng hệ thống thời gian thực và với sự hỗ trợ của bộ công cụ XPC Target có thể chuyển chương trình mô phỏng thành chương trình điều khiển thời gian thực. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển minh họa ở hình 1. Máy tính chủ (Host) sử dụng để thiết kế và mô phỏng hệ thống điều khiển nên sử dụng máy tính có cấu hình mạnh, nên sử dụng máy P3 trở lên. Khi hệ thống mô phỏng đã hoạt động tốt thì chuyển thành chương trình điều khiển thời gian thực tải xuống máy tính điều khiển thiết bị. Máy tính điều khiển thiết bị (Target) chỉ cần loại có cấu hình từ 486 trở lên. Tuy nhiên để có thể triển khai được các thuật toán điều khiển phức tạp cần nhiều tính toán (như điều khiển thích nghi, điều khiển dự báo,...) nên chọn máy có cấu hình không quá thấp. Trong máy tính Target có gắn card thu thập số liệu, trong nghiên cứu của chúng tôi, hiện tại đang sử dụng card PCL-818L (hãng Advantech). Card PCL-818L có 16 kênh chuyển đổi AD 12 bit, 1 kênh chuyển đổi DA 12 bit và 16 ngõ vào/ra song song. Cấu hình như vậy là đủ để điều khiển các đối tượng thông thường và có thể mở rộng gắn 2 card PCL-818L trên cùng một máy tính. Đối tượng điều khiển hiện nay chúng tôi chọn hai đối tượng điển hình thường dùng trong việc kiểm chứng lý thuyết điều khiển là hệ con lắc ngược và hệ bồn chứa liên kết tương tự như các mô hình đề cập đến trong [2]. Phần công suất và các mạch đo được thiết kế sao cho phù hợp với ngõ vào/ra tương tự và số trên card PCL-



818L. Với cấu hình như trên hệ thống rất linh hoạt, việc chuyển từ thí nghiệm này sang thí nghiệm khác rất đơn giản chỉ cần vài thao tác trên cửa sổ SIMULINK.

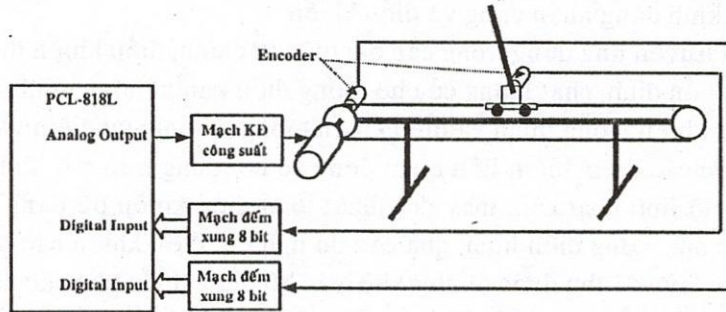


Hình 1: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển áp dụng trong việc xây dựng các bài thí nghiệm

### 3. THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

#### 3.1. Hệ xe-con lắc

Hệ xe-con lắc là đối tượng điều khiển điển hình thường được sử dụng để kiểm chứng lý thuyết điều khiển tự động. Hệ thống gồm con lắc có trục quay tự do được gắn vào xe kéo bởi động cơ điện DC, xe chuyển động trên đường ray thẳng, xem hình 2. Hệ thống có thể hoạt động ở hai chế độ con lắc xuôi và con lắc ngược. Ở chế độ con lắc xuôi ta có mô hình hệ cần cầu, yêu cầu điều khiển hệ cần cầu là điều khiển vị trí xe tới vị trí đích càng nhanh càng tốt trong khi vẫn giữ cho con lắc ít dao động. Ở chế độ con lắc ngược mô hình toán của hệ thống tương tự như mô hình điều khiển định hướng tàu vũ trụ, yêu cầu điều khiển hệ con lắc ngược là điều khiển xe để giữ con lắc cân bằng ở vị trí thẳng đứng. Hệ con lắc ngược là hệ thống không ổn định vòng hở, con lắc luôn ngã xuống trừ khi có lực thích hợp tác động vào xe. Ngoài ra còn có bài toán điều khiển lắc lên (swing-up) chuyển con lắc từ vị trí xuôi sang vị trí ngược. Dù hoạt động ở chế độ nào thì hệ xe-con lắc cũng là hệ phi tuyến có số bậc tự do lớn hơn số cơ cấu tác động nên rất khó điều khiển. Hệ xe-con lắc có thể chuyển đổi thành nhiều đối tượng điều khiển khác nhau nên phù hợp chọn làm mô hình thí nghiệm.

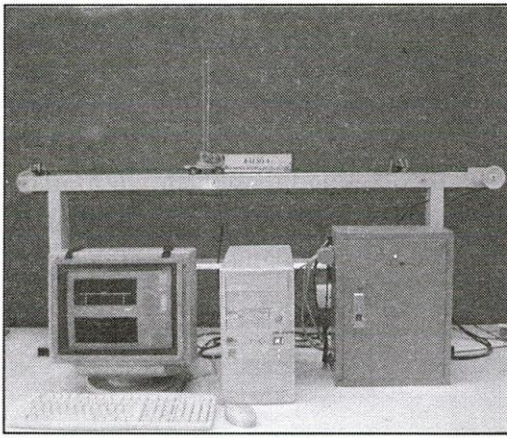


Hình 2: Sơ đồ khối phần cứng hệ xe-con lắc

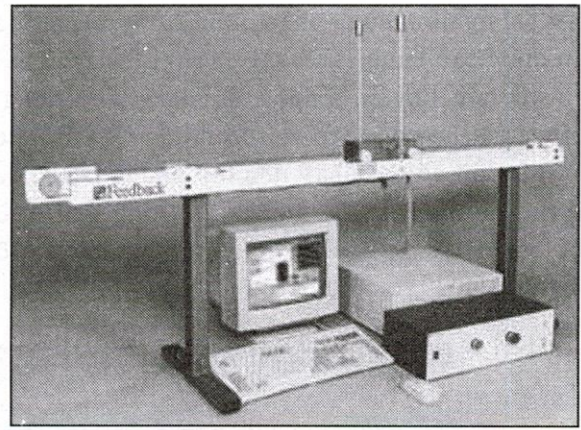
#### Phần cứng

Động cơ sử dụng để kéo xe là động cơ servo 24VDC, có gắn đĩa mã (encoder) cùng trục quay với động cơ để đo dịch chuyển. Truyền động từ động cơ sang xe nhờ vào các pu-li và dây cu-roa, hai đầu đường ray có gắn các cảm biến hành trình để cắt nguồn cấp cho động cơ khi vị trí xe vượt quá giới hạn vật lý cho phép. Cảm biến đo góc quay của con lắc là đĩa mã loại 1000 xung/vòng. Có thể sử dụng card đếm xung đĩa mã chuyên dụng như card CIO-QUAD02, tuy nhiên chúng tôi không chọn phương án trên vì tăng giá thành. Thay vào đó sử dụng mạch đếm xung lên/xuống 8 bit, số bit của bộ đếm được chọn sao cho khi hệ thống dịch chuyển với tốc độ cực đại thì trong 1 chu kỳ lấy mẫu (tối đa là 10ms) thì bộ đếm không bị tràn. Card PCL-818L đọc giá trị bộ đếm qua các ngõ vào số. Chương trình điều khiển so sánh giá trị bộ đếm ở hai lần lấy mẫu liên tiếp sẽ xác định được dịch chuyển của xe hay góc quay của con lắc. Mạch công suất điều khiển điều khiển động cơ là mạch khuếch đại đẩy-kéo (push-pull). Do giới hạn độ dài bài báo chúng tôi không trình bày chi tiết các sơ đồ mạch. Phần cứng hoàn chỉnh đã thi công trình bày ở hình 4. So sánh với hệ xe-con lắc do hãng Feedback sản xuất ở hình 5.





Hình 4: Hệ xe-con lắc chế tạo tại PTN ĐKTĐ

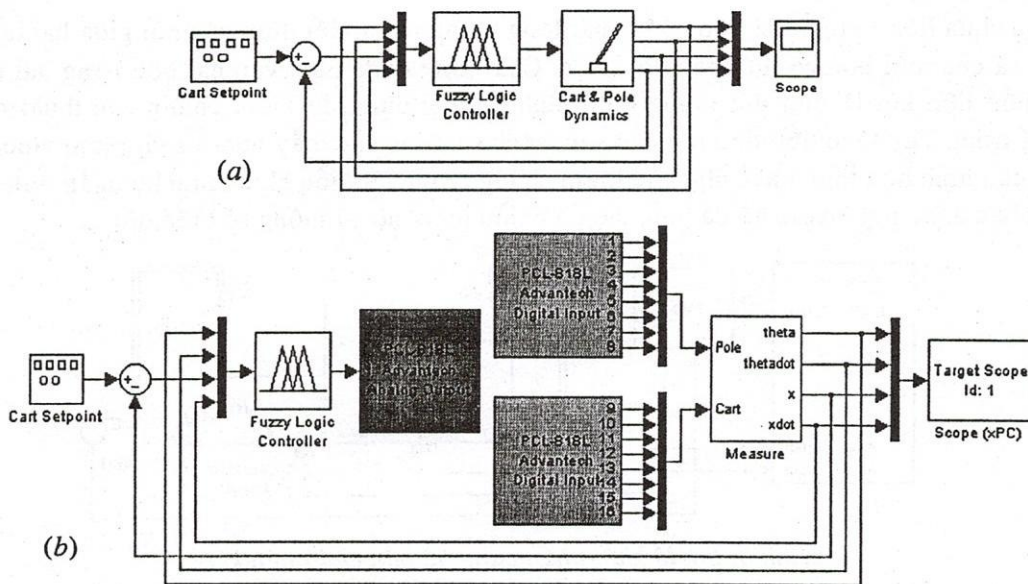


Hình 5: Hệ xe-con lắc hãng Feedback

**Phần mềm thí nghiệm**

Hiện tại phần mềm thí nghiệm hệ xe-con lắc được thiết kế theo hai hướng:

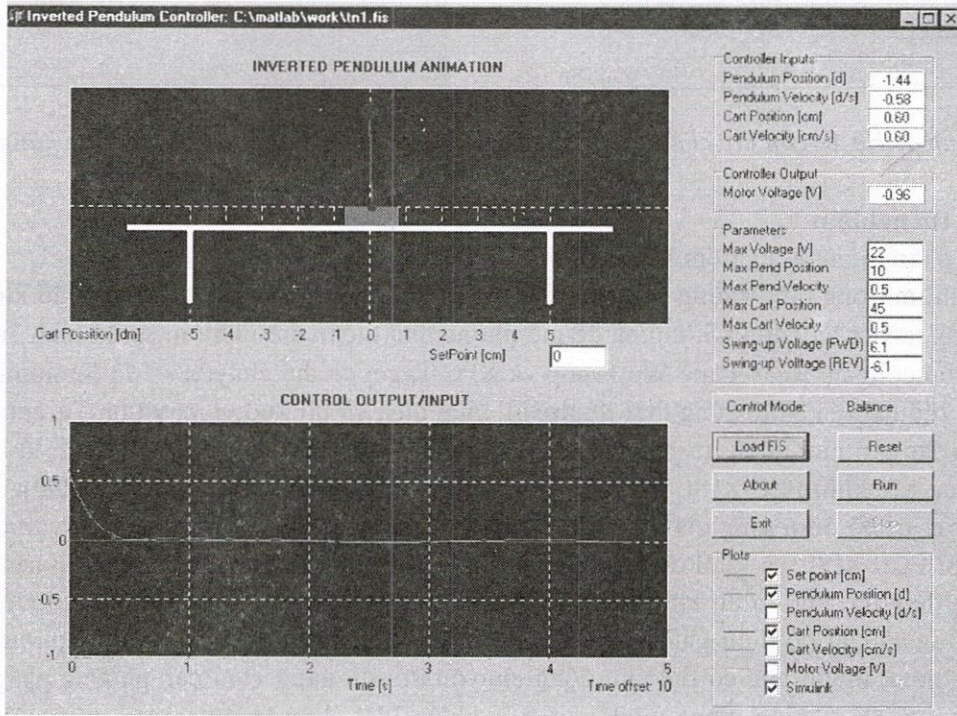
- Thí nghiệm trong môi trường Matlab. Trước đây khi không có phần cứng thật để kiểm chứng lý thuyết, chúng ta vẫn hay dùng Simulink để mô phỏng thuật toán điều khiển (sơ đồ hình 3a). Với sự hỗ trợ của các bộ công cụ Real-Time Workshop và XPC Target có thể chuyển sơ đồ Simulink quen thuộc thành sơ đồ điều khiển phần cứng thật (hình 3b), biên dịch và tải xuống máy tính Target. Dễ thấy hai sơ đồ 3a và 3b gần như tương tự nhau. Khối mô phỏng đặc tính động hệ xe-con lắc ở hình 3a được thay thế bằng các khối PLC-818L giao tiếp phần cứng và khối hàm đo lường thực hiện các tính toán để chuyển giá trị bộ đếm sang giá trị góc lệch và vận tốc góc của con lắc, vị trí và vận tốc xe ở hình 3b. Các khối PCL-818L và khối đo lường phụ thuộc vào phần cứng và đã được lập trình sẵn, người học chỉ cần thay thế khối điều khiển mờ trong hai sơ đồ bằng các thuật toán điều khiển khác hoặc thay đổi thông số của bộ điều khiển để thực hiện các thí nghiệm. Thực hiện thí nghiệm theo hướng này rất linh hoạt, người học có thể chủ động chuyển đổi dễ dàng giữa các phương pháp điều khiển thông thường và điều khiển thông minh như điều khiển PID, điều khiển tối ưu, thích nghi, bền vững, điều khiển mờ, điều khiển dùng mạng thần kinh nhân tạo,... để so sánh và rút ra ưu khuyết điểm của từng phương pháp.



Hình 3: (a) Sơ đồ SIMULINK mô phỏng hệ xe-con lắc  
(b) Sơ đồ điều khiển thời gian thực hệ xe-con lắc



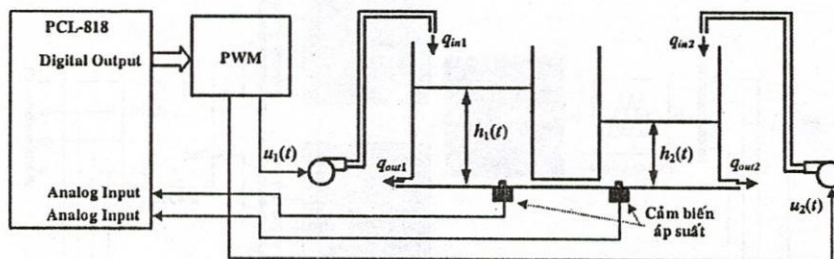
• Thí nghiệm dùng phần mềm riêng, chạy độc lập. Hướng xây dựng phần mềm riêng chạy độc lập vẫn được các hãng sản xuất thiết bị thí nghiệm hay dùng nhằm chủ động về chương trình nguồn và bảo vệ bản quyền. Chúng tôi đang xây dựng phần mềm BKIC (Bach Khoa Intelligent Control Software) chạy độc lập viết trên nền C++ Builder. Hiện nay BKIC chỉ mới hoàn tất phần điều khiển mờ. Mặc dù có thể chạy độc lập nhưng BKIC vẫn được thiết kế theo hướng tương thích với Matlab. Có thể tạo ra bộ điều khiển mờ trong môi trường BKIC hoặc đọc tập tin \*.FIS của Matlab/Fuzzy Toolbox. Giao diện với với người dùng được thiết kế thân thiện, cho phép dễ dàng thay đổi thông số bộ điều khiển, vẽ đồ thị, ...



Hình 5: Giao diện thí nghiệm điều khiển mờ

### 3.2. Hệ bồn chứa liên kết

Hệ bồn chứa liên kết gồm 2 bồn chứa chất lỏng thông nhau, tiết diện van nối giữa hai bồn và tiết diện van xả của mỗi bồn có thể thay đổi được. Chất lỏng được bơm vào hai bồn bằng hai máy bơm DC. Hệ bồn liên kết là một đối tượng điển hình thường dùng để kiểm chứng các thuật toán điều khiển quá trình. Tùy theo tiết diện mở các van, cách sử dụng các máy bơm và tầm làm việc mà ta có được các cấu hình hệ thống khác nhau để kiểm chứng lý thuyết điều khiển như hệ quán tính bậc 1, hệ quán tính bậc 2, hệ phi tuyến, hệ đa biến, hệ có nhiễu loạn, hệ có thông số biến đổi,...



Hình 6: Sơ đồ khối phân cứng hệ bồn chứa liên kết

#### Phần cứng

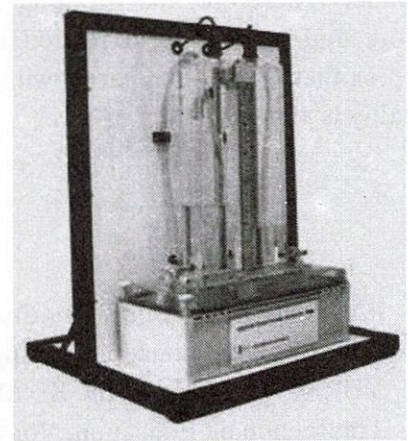
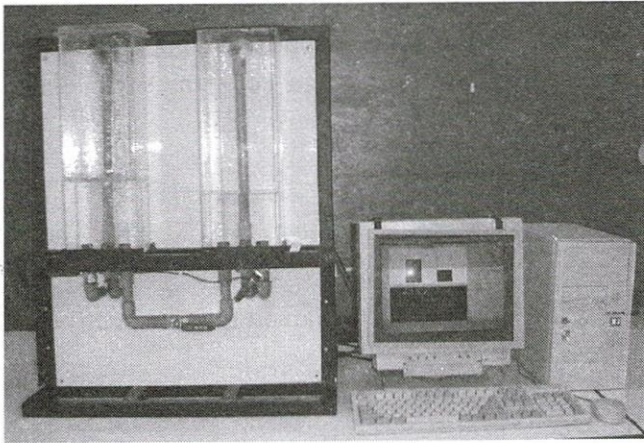
Sử dụng cảm biến áp suất Model 68075 (hãng Cole-Parmer) để đo chiều cao mực chất lỏng trong bồn chứa. Khi áp suất cột chất lỏng trong bồn thay đổi từ 0-5psig thì dòng ra của cảm biến thay đổi



trong khoảng 4-20mA, dùng điện trở 560Ω để biến đổi dòng thành áp. Máy tính đọc điện áp này qua ngõ vào tương tự của card PCL-818L. Chất lỏng bơm vào bồn bằng máy bơm DC 12V với công suất bơm cực đại định mức 70 lit/phút. Lưu lượng bơm thay đổi bằng cách thay đổi điện áp cấp cho máy bơm theo phương pháp điều rộng xung. Bộ điều rộng xung sử dụng vi điều khiển P89C51RD2 của hãng Philip. Do máy bơm là phần tử tác động phi tuyến có đặc tính vùng chết (dưới 30% điện áp định mức lưu lượng bằng 0) và bão hòa (trên 80% điện áp định mức lưu lượng biến đổi không đáng kể) nên khối điều rộng xung ở hình 6 ngoài chức năng thay đổi điện áp còn có chức năng tuyến tính hóa đặc tính máy bơm để loại bỏ yếu tố phi tuyến không mong muốn này. Hình 6 là ảnh chụp hệ bồn liên kết đã được thi công hoàn chỉnh, hình 7 trình bày hệ bồn chứa liên kết của hãng Kent Ridge Instrument nhằm mục đích so sánh.

### Phần mềm

Về cơ bản phần mềm thí nghiệm được xây dựng như đã làm đối với hệ xe-con lắc, nghĩa là xây dựng thí nghiệm theo hai hướng thí nghiệm trong môi trường Matlab và thí nghiệm dùng phần mềm BKIC. Sơ đồ điều khiển thời gian thực hệ bồn liên kết có thể suy ra dễ dàng từ sơ đồ điều khiển hệ xe-con lắc. Do giới hạn độ dài bài báo nên chúng tôi trình bày lại chi tiết trong mục này.



Hình 7: Hệ bồn liên kết chế tạo tại PTN ĐKTD      Hình 8: Hệ bồn liên kết hãng Kent Ridge Instrument

## 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương án xây dựng thí nghiệm ĐKTM theo hướng số hóa sử dụng máy tính PC và card thu thập dữ liệu PCL-818L. Do phần cứng và phần mềm đều được chuẩn hóa nên các thiết bị thí nghiệm có độ linh hoạt cao, cho phép thiết kế những bài thí nghiệm mở, rất phù hợp với thí nghiệm ĐKTM đòi hỏi sự sáng tạo của học viên. Về giá thành phương án đề xuất rõ ràng là rất hiệu quả vì có thể tận dụng các máy tính 486, 586 cũ dùng làm máy tính Target, máy tính chủ có thể dùng chung với nhiều ứng dụng khác. Giá thành của các thiết bị thí nghiệm chỉ khoảng 1/3 so với thiết bị ngoại nhập có cùng tính năng kỹ thuật mà chất lượng gần như tương đương. Kết quả đạt được cho thấy khả năng chế tạo thiết bị thí nghiệm chất lượng cao, giá thành thấp từ nguồn lực trong nước là hoàn toàn khả thi trong thực tế.

Các thiết bị thí nghiệm xây dựng được đã đáp ứng được một phần nhu cầu thí nghiệm ĐKTM của học viên Cao học. Mô hình hệ xe-con lắc còn được sử dụng giảng dạy thí nghiệm điều khiển mở cho sinh viên Đại học chuyên ngành ĐKTD. Ngoài thí nghiệm ĐKTM học viên có thể sử dụng mô hình để kiểm chứng các phương pháp điều khiển khác. Trong học kỳ 2 năm học 2002-2003 có 4 sinh viên đại học và 2 học viên Cao học đang làm luận án tốt nghiệp sử dụng mô hình hệ bồn chứa liên kết và hệ xe-con lắc.

Trong thời gian tới chúng tôi tiếp tục hoàn chỉnh dần chương trình BKIC. Hiện tại mới xây dựng được các bài thí nghiệm điều khiển mở trực tiếp trên BKIC, cần tiếp tục nghiên cứu để triển khai ứng



dụng các thuật toán điều khiển cao cấp hơn như điều khiển thích nghi mờ, điều khiển giám sát mờ, điều khiển dùng mạng thần kinh nhân tạo, hệ mờ di truyền, ... Với cấu hình hệ thống đã thiết kế việc tích hợp các thuật toán điều khiển khác vào phần mềm BKIC là điều hoàn toàn có thể thực hiện được trong tương lai gần.

## BUILDING INTELLIGENT CONTROL EXPERIMENTS AT LOW COST

Huynh Thai Hoang, Nguyen Vinh Hao

**ABSTRACT:** The paper represents our research on designing and implementing hardware devices and software programs for teaching experiments on intelligent control. Hardware is interfaced with computer via PCL-818 data acquisition card (Advantech) and software is written based on C++ Builder. Therefore, the resulting equipment is quite compatible with Matlab/Simulink, Real-Time Work and other control related toolboxes. The cost for building the experiment apparatuses is approximately 1/3 compared with the equivalent ones produced by foreign companies while the quality is almost the same.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. PASSINO K.M, "Intelligent Control: An Overview of Techniques", In T. Samad Ed. Perspective in Controls: New Concept and Applications, IEEE Press, 2001.
2. YURKOVICH S. AND K. M. PASSINO, "A Laboratory Course on Fuzzy Control", IEEE Transaction on Education, Vol 42(1), 1999.
3. P. X. MINH, N. D. PHƯỚC, H. M. SƠN, N. Đ. KHOÁT, P. N. MINH và N. M. TIẾN "Xây dựng bàn thí nghiệm điều khiển thông minh đối tượng nhiệt", Hội nghị toàn quốc lần 5 về Tự động hoá, Hà Nội 24-26/10, 2002.
4. P. X. MINH, N. D. PHƯỚC, H. M. SƠN, N. Đ. KHOÁT, P. N. MINH và N. M. TIẾN "Xây dựng bàn thí nghiệm điều khiển thông minh đối tượng mức và lưu lượng", Hội nghị toàn quốc lần 5 về Tự động hoá, Hà Nội 24-26/10, 2002.
5. N. M. TIẾN, N. D. HUY và N. T. L. ANH, "Hệ thống thiết bị thông minh điều khiển số con lắc", Hội nghị toàn quốc lần 5 về Tự động hoá, Hà Nội 24-26/10, 2002.