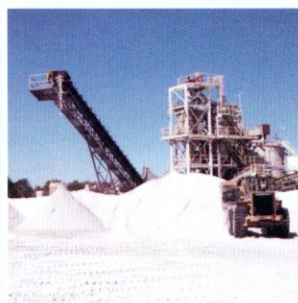


TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG  
LÊ NHỌ BỘI

# KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN TRONG XÂY DỰNG



NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG  
LÊ NHỌ BỘI

Hiện nay công nghệ tự động là một trong những hướng phát triển công nghệ mũi nhọn của đất nước trong thế kỷ XXI. Nghị quyết số 27/CP ngày 28/3/1997 của Chính phủ về ứng dụng và phát triển công nghệ tự động hóa phục vụ công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước, đã khẳng định vai trò quan trọng của Ngành Công nghiệp Tự động hóa.

Những công trình công nghiệp lớn và trọng điểm hiện nay đều được tự động hóa ở mức độ tương đối cao và phần nhiều đều do nước ngoài đảm nhiệm từ khâu thiết bị đến chuyên gia kỹ thuật. Ngành Công nghiệp Xây dựng cũng là một trong những lĩnh vực điển hình.

Định hướng tài làm chủ được một cách toàn diện các công nghệ mới này, các kỹ sư và cán bộ kỹ thuật không những có khả năng sử dụng, vận hành tốt mà còn phải có kiến thức để thiết kế, chế tạo và lắp đặt các thiết bị, cải tiến thiết bị công nghệ hiện có.

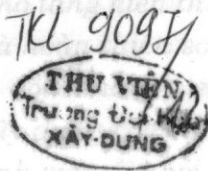
Đinh cao của kỹ thuật hiện tại là điều khiển tự động. Các thiết bị và dây chuyền sản xuất tự động đã xuất hiện ngày càng nhiều trong mọi ngành công nghiệp, đặc biệt là trong ngành Xây dựng. Để đáp ứng nhu cầu nghiên cứu và ứng dụng lý thuyết điều khiển tự động trong xây dựng.

Lý thuyết điều khiển tự động là cả một kho tàng kiến thức khổng lồ. Công cụ để điều khiển tự động không ngừng đổi mới và phát triển. Mọi công việc đều dựa trên những nguyên lý cơ bản còn hầu như không thay đổi. Trong lĩnh vực điều khiển tự động trong lĩnh vực công nghiệp xây dựng, các tài liệu về điều khiển tự động trong lĩnh vực công nghiệp xây dựng hạn chế, trong khi nhu cầu về tài liệu học tập và nghiên cứu cho sinh viên đại học ngày càng cao và mang tính cấp bách. Những điều trên đã thúc bách tác giả biên soạn cuốn giáo trình này.

Giáo trình "Kỹ thuật điều khiển trong xây dựng" gồm hai phần: Phần 1: "Cơ sở lý thuyết điều khiển", Phần 2: "Kỹ thuật điều khiển trong xây dựng".

Phần 1: "Cơ sở lý thuyết điều khiển" cung cấp đầy đủ những khái niệm và kiến thức cơ bản về lý thuyết điều khiển tự động, giúp cho người đọc nắm bắt được những nội dung cần thiết về hệ thống điều khiển và điều chỉnh tự động như các phương pháp mô tả hệ thống điều khiển tự động tuyến tính, các phương pháp phân tích và tính toán hệ thống điều khiển tự động, vai trò của công việc phân tích tính làm việc ổn định và đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển tự động. Trên cơ sở đó nêu ra các giải pháp để tổng hợp và thiết kế các khâu hiệu chỉnh, các bộ điều khiển cũng như tính chọn các thông số tối ưu cho phần tử hoặc hệ thống. Phần này gồm 5 chương:

Chương 1: Khái niệm và **NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG**  
HÀ NỘI - 2012



# PHẦN I

## CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN

### Chương 1

## NHỮNG KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ ĐIỀU KHIỂN TỰ ĐỘNG

### §1.1. KHÁI NIỆM CHUNG

#### 1.1.1. Một số định nghĩa

*Tự động hoá* là môn khoa học thực nghiệm dùng để nghiên cứu những nguyên tắc thiết lập và tính toán cho một hệ thống tự động.

*Hệ thống tự động hoá* là tổ hợp các thiết bị kỹ thuật thực hiện những chức năng cơ bản riêng biệt mà không có sự tham gia trực tiếp của con người.

Tự động hoá bao gồm hai phần:

- Lý thuyết điều khiển tự động.
- Các phần tử tự động.

*Điều khiển* là quá trình thu thập thông tin, xử lý thông tin “gần” với mục đích định trước.

*Điều khiển tự động (ĐKTD)* là môn khoa học nghiên cứu về quá trình thu thập, xử lý thông tin và điều khiển các quá trình công nghệ, các hệ thống thiết bị kỹ thuật trong đó không có sự tham gia trực tiếp của con người.

*Đối tượng điều khiển (ĐTĐK)* là hệ thống các thiết bị kỹ thuật trong đó xảy ra quá trình điều khiển tự động.

*Điều chỉnh tự động* là sự biến đổi của một đại lượng vật lý nào đó theo quy luật yêu cầu trong đó không có sự tham gia trực tiếp của con người. Điều chỉnh tự động là một khái niệm hẹp của điều khiển tự động.

*Cơ quan điều chỉnh (CQ)* là một bộ phận kết cấu của đối tượng điều khiển, trong đó nếu tác động lên nó (bằng tay hoặc tự động) có thể làm thay đổi đại lượng điều chỉnh, điều hoà những biến đổi không có lợi của nó do ảnh hưởng của các tác động nhiễu.

*Thiết bị điều khiển (TBĐK)* hay còn gọi là bộ điều khiển là những thiết bị thực hiện tự động vấn đề điều khiển và điều chỉnh trong đối tượng điều khiển.

*Đối tượng điều khiển và thiết bị điều khiển tác động tương hỗ tạo nên hệ thống điều khiển tự động.*



### 1.1.2. Các đại lượng đặc trưng của hệ thống điều khiển tự động

**Đại lượng điều chỉnh (tín hiệu ra) - Controlled output  $c(t)$ :** là đại lượng đặc trưng cho trạng thái của đối tượng điều khiển và xác định sự hoạt động của toàn bộ hệ thống điều khiển và điều chỉnh tự động. Tín hiệu ra còn gọi là đáp ứng của hệ thống.

**Tác động chủ đạo (tín hiệu vào) - Reference input  $r(t)$ :** là đại lượng đặc trưng cho quy luật biến đổi theo yêu cầu của đại lượng điều chỉnh.

**Tác động nhiễu  $n(t)$ :** là nguyên nhân hoặc tác động bất kỳ làm ảnh hưởng tới đại lượng điều chỉnh theo chiều hướng không có lợi (làm cho đại lượng điều chỉnh sai lệch so với yêu cầu). Tác động nhiễu có thể xuất hiện ở bên ngoài hoặc bên trong hệ thống điều khiển tự động.

**Tác động điều khiển  $u(t)$ :** là một biến số hoặc tham số được lựa chọn như một phương tiện không chế giá trị yêu cầu của đại lượng điều chỉnh khi đại lượng điều chỉnh bị sai lệch so với giá trị yêu cầu do tác động của nhiễu.

**Tác động phản hồi (tín hiệu hồi tiếp)  $c_{ht}(t)$ :** là tác động của tín hiệu ra trở lại đầu vào nhằm phản ánh sai lệch giữa giá trị đo được của đại lượng điều chỉnh và giá trị mong muốn theo yêu cầu. Thông thường trong hệ thống điều khiển tự động người ta sử dụng phản hồi âm, tín hiệu hồi tiếp ngược dấu với tín hiệu vào. Hệ thống có phản hồi âm có tính ổn định cao.

**Lượng sai số (độ lệch) của đại lượng điều chỉnh:** là hiệu giữa giá trị thực đo được và giá trị cho trước (trị số yêu cầu) của đại lượng điều chỉnh.

Hiệu ngược lại gọi là sai số (error) của hệ thống:  $e(t) = r(t) - c_{ht}(t)$ .

### 1.1.3. Các phần tử cơ bản của hệ thống điều khiển tự động

Một hệ thống điều khiển tự động được thiết lập từ ba thành phần cơ bản:

- Thiết bị điều khiển (bộ điều khiển);

- Đối tượng điều khiển;

- Thiết bị đo lường (cảm biến).

Trên hình 1.1 là sơ đồ khối của một hệ thống điều khiển tự động. Trong các hệ thống điều khiển tự động thường có các loại tín hiệu sau đây tác động:

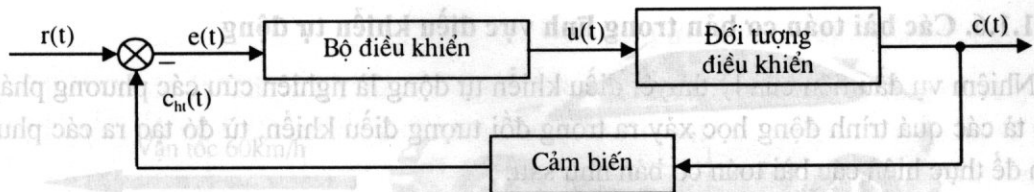
-  $r(t)$  (reference input): tín hiệu vào (tín hiệu chuẩn) gọi là tác động chủ đạo.

-  $c(t)$  (controlled output): tín hiệu ra là đại lượng cần được điều khiển hay điều chỉnh.

-  $c_{ht}(t)$ : tín hiệu phản hồi.

-  $e(t)$ : tín hiệu sai lệch (error).

-  $u(t)$ : tín hiệu điều khiển, hay còn gọi là tác động điều khiển do thiết bị điều khiển phát ra và tác động vào đối tượng điều khiển nhằm mục đích khắc phục sai số  $e(t)$  giữa đại lượng cần điều khiển và trị số theo yêu cầu của nó.



**Hình 1.1.** Sơ đồ cấu trúc của một hệ thống điều khiển tự động

#### 1.1.4. Các trạng thái của hệ thống điều khiển tự động

Hệ thống điều khiển tự động bất kỳ đều là hệ thống động, có nghĩa là các đại lượng đặc trưng luôn biến đổi theo thời gian. Các hệ thống động bao giờ cũng tồn tại ở một trong hai trạng thái sau:

- **Trạng thái xác lập:** là trạng thái làm việc của hệ thống mà trong đó sau khi kết thúc ảnh hưởng của tác động kích thích, đại lượng điều chỉnh trở về trị số ban đầu hoặc không đổi. Các đại lượng trong hệ thống đều đạt giá trị ổn định. Trường hợp tín hiệu vào là không đổi thì trạng thái xác lập của hệ thống tương ứng là trạng thái tĩnh.

Trạng thái xác lập đánh giá độ điều chỉnh chính xác của hệ thống. Nếu ở trạng thái xác lập mà vẫn còn tồn tại sai lệch giữa tín hiệu theo yêu cầu (thường gọi là tín hiệu đặt hay tín hiệu chủ đạo) và tín hiệu đo được thì giá trị sai lệch này được gọi là sai số dư (còn gọi là sai số tĩnh).

- **Trạng thái quá độ:** là quá trình chuyển tiếp từ trạng thái xác lập này sang trạng thái xác lập khác, hoặc là quá trình tính từ thời điểm bắt đầu có tác động nhiễu cho đến khi hệ thống đạt được trạng thái xác lập mới.

Lý thuyết điều khiển tự động chủ yếu mô tả, phân tích và tính toán trạng thái quá độ của hệ thống.

#### 1.1.5. Vai trò của lý thuyết điều khiển tự động

Tự động hóa các quá trình công nghệ luôn gắn với một quá trình công nghệ cụ thể (tự động hóa quá trình sản xuất xi măng, tự động hóa quá trình sản xuất vật liệu xây dựng...) trong khi đó điều khiển quá trình là một nội dung khoa học và kỹ thuật cơ sở, được xây dựng trên nền tảng phương pháp luận của lý thuyết điều khiển tự động, kết hợp với ứng dụng của công nghệ thông tin công nghiệp và những nguyên lý cơ bản của các quá trình vật chất và năng lượng. Thực tế cho thấy lý thuyết điều khiển tự động đóng một vai trò không thể thiếu được trong việc tổng hợp các giải pháp tự động hóa cho một quá trình hoặc dây chuyền công nghệ. Có thể liệt kê các vai trò của lý thuyết điều khiển tự động như sau:

- Được ứng dụng để giải quyết vấn đề khi đáp ứng của hệ thống không thỏa mãn những yêu cầu đặt ra.
- Làm tăng độ chính xác trong điều khiển và điều chỉnh tự động.
- Làm tăng năng suất lao động.
- Làm tăng hiệu quả kinh tế.

### 1.1.6. Các bài toán cơ bản trong lĩnh vực điều khiển tự động

Nhiệm vụ đầu tiên của lý thuyết điều khiển tự động là nghiên cứu các phương pháp để mô tả các quá trình động học xảy ra trong đối tượng điều khiển, từ đó tạo ra các phương tiện để thực hiện các bài toán cơ bản như sau:

#### 1.1.6.1. Phân tích hệ thống

Đối với một hệ thống điều khiển tự động với cấu trúc và các thông số đã biết, bài toán đặt ra là xác định đáp ứng của hệ thống và đánh giá chất lượng của hệ.

Trong bài toán phân tích, sau khi nghiên cứu các trạng thái làm việc của hệ thống theo các tham số cho trước, cần xác định các thông số của các phần tử để đảm bảo hệ thống làm việc ổn định, tiếp đó là tính toán, lựa chọn các thông số để đảm bảo các chỉ số chất lượng.

#### 1.1.6.2. Thiết kế hệ thống

Với bài toán thiết kế hệ thống, khi biết cấu trúc và thông số của đối tượng điều khiển, yêu cầu đặt ra là thiết kế bộ điều khiển để sao cho có được một hệ thống thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng.

Nội dung của bài toán thiết kế thường là chọn phương án cấu hình, phương án sơ đồ kết cấu, tính toán và lựa chọn các tham số hiệu chỉnh theo yêu cầu về độ nhạy, độ điều chỉnh chính xác,...

#### 1.1.6.3. Nhận dạng hệ thống

Trường hợp chưa biết cấu trúc và thông số của hệ thống, cần thực hiện bài toán nhận dạng hệ thống, có nghĩa là xác định cấu trúc và thông số của hệ thống theo những thông tin hoặc dữ liệu ban đầu có được.

Môn học lý thuyết điều khiển tự động chỉ giải quyết bài toán phân tích hệ thống và thiết kế hệ thống. Bài toán nhận dạng hệ thống sẽ được nghiên cứu trong các môn học khác. Ở đây ta chỉ phân tích một ví dụ minh họa cho bài toán nhận dạng hệ thống như sau:

*Ví dụ:* Lái xe, mục tiêu giữ tốc độ xe ổn định  $v = 60 \text{ km/h}$ .

Trong ví dụ này, con người có vai trò là một bộ điều khiển tự động. Đối tượng điều khiển là xe ô tô. Đại lượng điều chỉnh đặc trưng cho quy luật biến đổi theo yêu cầu là giá trị cần không chế không đổi của vận tốc xe  $v = 60 \text{ km/h} = \text{const}$ .

Hệ thống có thể được nhận dạng như sau:

- Mắt quan sát đồng hồ đo tốc độ: quá trình thu thập thông tin.
- Bộ não điều khiển tăng tốc nếu  $v < 60 \text{ km/h}$ , giảm tốc nếu  $v > 60 \text{ km/h}$ : quá trình xử lý thông tin.
- Giảm ga hoặc tăng ga: tác động lên hệ thống.
- Kết quả của quá trình điều khiển: xe chạy với tốc độ “gần” bằng  $60 \text{ km/h}$ .

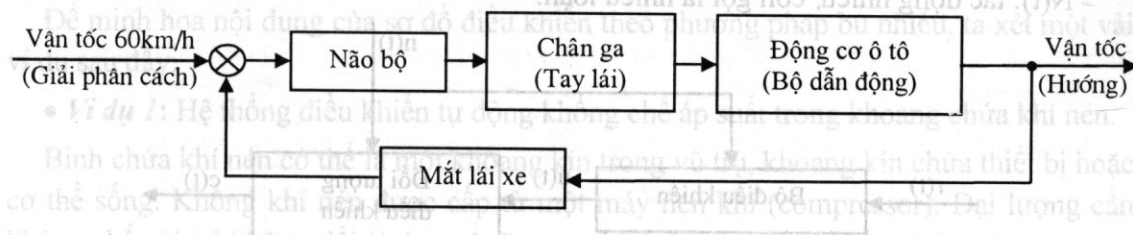




**Hình 1.2. Ví dụ về nhận dạng hệ thống**

Theo yêu cầu của bài toán là không chế vận tốc không đổi  $v = 60 \text{ km/h}$ . Trường hợp bài toán đặt ra là yêu cầu lái xe hướng bám theo dải phân cách thì hệ thống cũng được nhận dạng tương tự. Ngoài ra, trong quá trình lái xe, người lái xe (bộ điều khiển) phải xử lý (bằng các thuật toán khác nhau) những tình huống trên đường như tránh ô gà ô voi, tránh các loại phương tiện khác, các sự cố xuất hiện đột ngột mà ta tạm coi là những tác động nhiễu. Nhận dạng một cách tổng quát, đây là một hệ thống đa biến (có nhiều biến vào và nhiều biến ra).

Sơ đồ khối của hệ thống được minh họa trên hình vẽ 1.3.



**Hình 1.3**

## §1.2. CÁC NGUYÊN TẮC ĐIỀU KHIỂN CƠ BẢN

Phương pháp hoặc hình thức để thiết bị điều khiển tạo ra tín hiệu điều khiển gọi là nguyên tắc điều khiển. Trong lĩnh vực điều khiển tự động, có 6 nguyên tắc điều khiển cơ bản sau:

- (1) Nguyên tắc thông tin phản hồi.
- (2) Nguyên tắc đa dạng tương xứng.
- (3) Nguyên tắc bổ sung ngoài.
- (4) Nguyên tắc dự trữ.
- (5) Nguyên tắc phân cấp.
- (6) Nguyên tắc cân bằng nội.

Ta sẽ phân tích nội dung chi tiết của từng nguyên tắc.

### 1.2.1. Nguyên tắc thông tin phản hồi

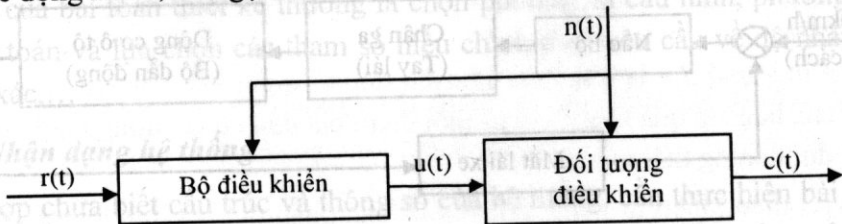
Để hệ thống điều khiển tự động có chất lượng cao thì buộc phải có phản hồi thông tin, tức là phải có đo lường các tín hiệu từ đối tượng điều khiển. Có 3 sơ đồ điều khiển dựa trên nguyên tắc phản hồi thông tin:

- Sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu.
- Sơ đồ điều khiển theo phương pháp giảm thiểu sai lệch.
- Sơ đồ điều khiển phối hợp.

#### 1.2.1.1. Sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu

Cấu hình của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu có dạng như hình 1.4. với các tín hiệu nêu trong sơ đồ là:

- $r(t)$  (reference input): tín hiệu vào (tín hiệu chuẩn) gọi là tác động chủ đạo.
- $c(t)$  (controlled output): tín hiệu ra là đại lượng cần được điều khiển hay điều chỉnh.
- $u(t)$ : tín hiệu điều khiển, hay còn gọi là tác động điều khiển do thiết bị điều khiển phát ra và tác động vào đối tượng điều khiển nhằm mục đích khắc phục sai số  $e(t)$  giữa đại lượng cần điều khiển và trị số theo yêu cầu của nó.
- $N(t)$ : tác động nhiễu, còn gọi là nhiễu loạn.



**Hình 1.4.** Cấu hình của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu

Nguyên lý cơ bản của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu là đo và xác định nhiễu, dựa theo kết quả đo được, thực hiện một tác động điều khiển tác động lên đối tượng điều khiển nhằm bù lại ảnh hưởng do tác động của nhiễu để duy trì đại lượng điều chỉnh theo quy luật yêu cầu.

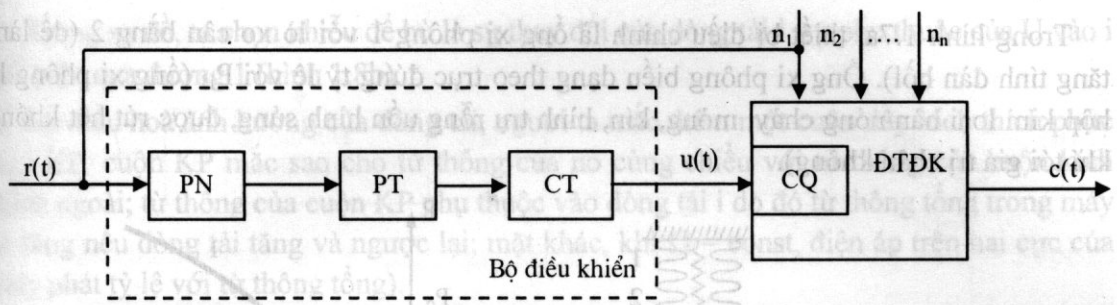
Sơ đồ cấu trúc điều khiển theo phương pháp bù nhiễu được nêu trên hình 1.5. Các phần tử cơ bản được sử dụng trong sơ đồ gồm có:

- Phần tử nhạy cảm PN (cảm biến): dùng để đo và xác định nhiễu.
- Cơ cấu thừa hành (CT): dùng để thiết lập tác động điều khiển hoặc điều chỉnh.
- Phần tử trung gian (PT): có chức năng khuếch đại công suất tín hiệu hoặc biến đổi tín hiệu.

Ưu điểm của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu là phản ứng nhanh và có cấu trúc đơn giản, song sơ đồ này gặp phải một số hạn chế như sau:

- Tính bất biến theo quy luật điều chỉnh của đại lượng điều chỉnh (tín hiệu ra) chỉ được đảm bảo trong mối tương quan với tác động nhiễu mà phần tử nhạy cảm đo được, ví dụ như đối với nhiễu  $n_1$  (trên hình 1.5).





**Hình 1.5.** Sơ đồ cấu trúc điều khiển theo phương pháp bù nhiễu

- Tính bất biến theo quy luật điều chỉnh của đại lượng điều chỉnh (tín hiệu ra) chỉ được đảm bảo trong mối tương quan tuyệt đối giữa các tham số của bộ điều khiển và của đối tượng điều khiển so với tính toán.

- Giá trị thực của đại lượng điều chỉnh hoặc tín hiệu cần điều khiển (tín hiệu ra) không thể đo và khống chế được, tác động điều khiển  $u(t)$  hoàn toàn không phụ thuộc vào tín hiệu ra  $c(t)$  do hệ thống làm việc theo chu trình hở.

Phạm vi ứng dụng của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu là trong các hệ thống tín hiệu, hệ thống kiểm tra tự động, hệ thống khóa truyền,...

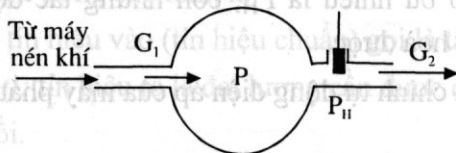
Để minh họa nội dung của sơ đồ điều khiển theo phương pháp bù nhiễu, ta xét một vài ví dụ sau đây:

• **Ví dụ 1:** Hệ thống điều khiển tự động khống chế áp suất trong khoang chứa khí nén.

Bình chứa khí nén có thể là một khoang kín trong vũ trụ, khoang kín chứa thiết bị hoặc cơ thể sống. Không khí nén được cấp từ một máy nén khí (compressor). Đại lượng cần khống chế giá trị không đổi là áp suất  $P$  trong bình (quy luật yêu cầu là  $P = P_0 = \text{const}$ ). Tác động nhiễu chính là sự thay đổi lưu lượng khí cấp  $G_1$  và khí xả  $G_2$  (hình 1.6).

+  $G_1$  thay đổi do công suất máy nén khí thay đổi (tốc độ động cơ truyền động thay đổi; trạng thái của các bộ phận tiêu thụ khí nén thay đổi).

+  $G_2$  thay đổi do áp suất môi trường bên ngoài  $P_H$  thay đổi ở các độ cao khác nhau.

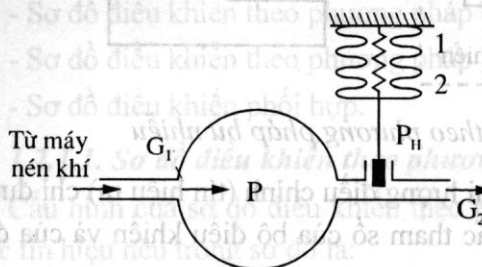


**Hình 1.6**

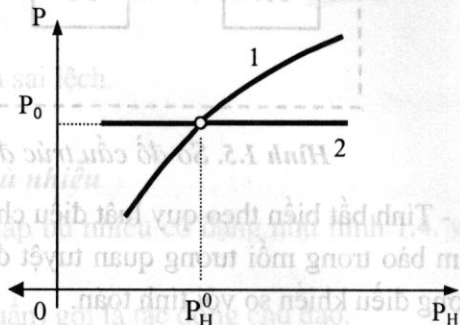
Tác động nhiễu bậc 2 có thể là sự thay đổi các tham số của không khí nén, của nhiệt độ môi trường, của cường độ trao đổi khí của cơ thể sống trong khoang...

Trong phương pháp bù nhiễu, ta chọn áp suất môi trường bên ngoài  $P_H$  là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất lên đại lượng điều chỉnh  $P$ . Các tác động nhiễu khác được coi như không đổi. Sự phụ thuộc của  $P$  vào  $P_H$  được thể hiện qua đường cong 1 trên hình 1.7b.

Trong hình 1.7a, thiết bị điều chỉnh là ống xi phong 1 với lò xo cân bằng 2 (để làm tăng tính đàn hồi). Ống xi phong biến dạng theo trực đứng tỷ lệ với  $P_H$  (ống xi phong là hộp kim loại hàn nóng chảy, mỏng, kín, hình trụ rỗng uốn hình súng, được rút hết không khí tới giá trị chân không).



Hình 1.7a



Hình 1.7b

Có thể nhận biết về nguyên lý làm việc của sơ đồ như sau:

Trạng thái của xi phong trên hình vẽ tương ứng với một độ cao nhất định của bình chứa khí nên và  $P = P_0$  với áp suất môi trường bên ngoài  $P_H = P_H^0$ . Nếu không có điều chỉnh tự động, khi  $P_H$  tăng, lượng khí xả  $G_2$  sẽ giảm và ngược lại, dẫn đến làm thay đổi áp suất trong bình.

Giả sử khi giảm độ cao,  $P_H$  tăng ( $P_H > P_H^0$ ), xi phong bị nén lại, van tiết lưu dịch chuyển lên trên (van đóng vai trò là cơ quan điều chỉnh), lưu lượng khí xả  $G_2$  sẽ tăng bù lại sự suy giảm khi  $P_H$  tăng và duy trì  $P = P_0$ .

Tương tự khi tăng độ cao,  $P_H$  giảm ( $P_H < P_H^0$ ), xi phong bị giãn ra, van tiết lưu dịch chuyển xuống, lưu lượng khí xả  $G_2$  giảm, bù lại sự tăng của  $G_2$  khi  $P_H$  giảm và duy trì  $P = P_0$ .

Điều này cho thấy, với mọi sự thay đổi của áp suất môi trường bên ngoài  $P_H$ , áp suất trong bình chứa là không đổi  $P = P_0 = \text{const}$  (đường 2 hình 1.7b).

Sơ đồ này chỉ cho phép bù nhiễu là  $P_H$ , còn những tác động nhiễu khác, hệ thống không thể phản ứng và điều hoà được.

• **Ví dụ 2:** Hệ thống điều chỉnh tự động điện áp của máy phát điện một chiều kích thích độc lập (hình 1.8a).

Dây quấn kích từ của máy phát được nối với nguồn điện một chiều có  $U_K = \text{const}$ . Phản ứng của máy phát quay với tốc độ  $\Omega = \text{const}$  từ một động cơ sơ cấp (không thể hiện trên hình vẽ). Đại lượng điều chỉnh là điện áp trên hai cực của máy phát  $U$ ; Quy luật yêu cầu là tại mọi thời điểm phải đảm bảo  $U = U_0 = \text{const}$ .

Tác động của nhiễu chính lên hệ thống là sự thay đổi của tốc độ  $\Omega$  và dòng tải  $i$ . Tác động của nhiễu bậc 2 là sự thay đổi nhiệt độ, độ ẩm môi trường, điện trở bộ chổi góp, điện áp nguồn kích từ,...