

Technologie de contrôle automatique

Contrôle du niveau, contrôle du débit, contrôle de la température,
Contrôle de moteur et de générateur à courant continu
Système de contrôlé simulé

La technologie de contrôle automatique est un terme couvrant le fonctionnement et la régulation des processus sans intervention humaine directe et continue.

Ce laboratoire a été conçu pour introduire les principes de base.

L'utilisateur final a la possibilité d'effectuer le contrôle de variables telles que la température, la lumière, le niveau, le débit et le moteur à courant continu de différentes manières comme PID, boucle ouverte, boucle fermée, continue et discontinu.

Son architecture est très simple et modulaire permettant à l'utilisateur d'apprendre les concepts d'une manière simple et d'en créer de nouveaux.

En plus de cet entraîneur, nous avons réalisé un tableau compact qui permet d'étudier les processus et les contrôleurs, le tout dans une seule unité, complète d'acquisition et de traitement logiciel d'acquisition et de traitement des données pour Windows.

Un laboratoire conçu pour l'étude de l'application du contrôle automatisé pour permettre à l'étudiant une formation pratique, basée sur la réalisation d'expériences guidées. Les composants de type industriel sont adaptés pédagogiquement en utilisant un système de panneaux modulaires pour permettre un assemblage facile pas à pas, du circuit le plus simple au système le plus complexe. Cette unité didactique a une structure modulaire et elle se compose de panneaux didactiques installés sur un châssis vertical. Il est fourni avec un manuel théorique et pratique.

La modularité de ce système didactique permet aux étudiants une approche directe et immédiate des sujets, en offrant la possibilité d'étudier différents sujets, en réalisant plusieurs expériences.

-IT.96ATC-TC

CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE

- Régulateur de température à deux positions
- Régulateur de température à deux positions avec rétroaction retardée
- Régulateur de température à deux positions avec retour élastique
- Régulateur à trois plages
- Contrôles PI, PI et PID de température en utilisant la méthode CHR

-IT.96ATC-LC

CONTRÔLE DE NIVEAU

-IT.96ATC-FC

CONTRÔLE DU DÉBIT

- Caractéristiques de la pompe
- Caractéristiques du système de mesure
- Caractéristiques du processus niveau/débit
- Contrôle niveau/débit avec ajusteur P
- Contrôle niveau/débit avec régulateur PI
- Régulation niveau/débit avec régulateur PID
- Régulation niveau/débit avec un régulateur à 2 positions

-IT.96ATC-MT

CONTRÔLE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU

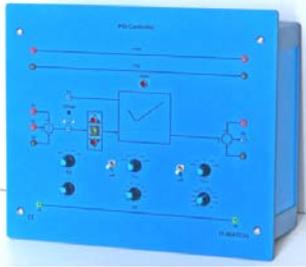
- Contrôles PI, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu en utilisant la méthode CHR.
- Contrôle d'un générateur de courant continu

-IT.96ATC-BS

SYSTÈME DE CONTRÔLÉ SIMULÉ

- Processus de premier ordre
- Processus de type I, contrôle du 2e ordre
- Processus supérieur au 1er ordre
- Contrôleur P
- Contrôleur I
- Contrôleur D
- Régulateur PID
- Contrôle, processus de type P
- Commande P, processus de 1er ordre et d'ordre supérieur
- Méthode dynamique Ziegler-Nichols
- Méthode statique de Chien-Hrones-Reswick
- Régulateur de position -2, processus de 1er ordre
- Régulateur de position -2, rétroaction retardée, processus de 2ème ordre





IT.96ATC-22 - CONTRÔLEUR PID

Ce module peut simuler un contrôleur industriel standard pour l'utiliser comme régulateur P, PI, PD ou PID dans des systèmes de contrôle automatique en boucle fermée..

Paramètres réglables en continu :

- gain proportionnel $K_p = 0 \dots 1000$
- temps d'action intégrale $T_I = 1 \text{ ms} \dots 100 \text{ s}$
- temps d'action différentielle $T_D = 0.2 \text{ ms} \dots 20 \text{ s}$



IT.96USB Unité d'acquisition des données et de contrôle

Unité d'interface : utilisée pour interconnecter les signaux du monde réel à un système d'acquisition de données.

- Alimentation depuis l'USB, < 100mA
- 2 sorties relais
- 2 sorties analogiques, série Convertisseur D/A 8 bits
 - Générateur de fonctions
- Sortie: -10/+10 V
- 8 entrées analogiques, convertisseur A/D 12 bits
 - Oscilloscope 4 canaux sur les entrées 1÷4
- Entrée: -10/+10 V
- Vitesse maximale de conversion : 10 kHz

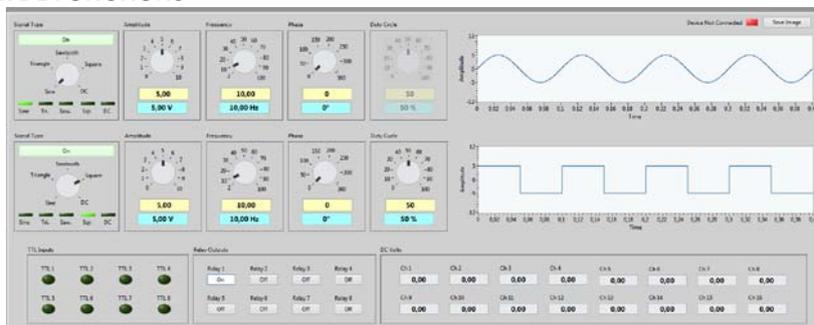


IT.96MSW Logiciel

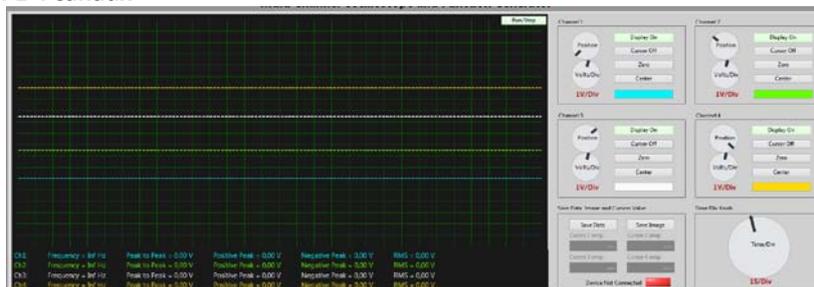
Générer les signaux de commande, acquérir et visualiser les signaux et les formes d'onde à analyser..

- Fenêtre de contrôle des entrées/sorties.
- Fenêtre du générateur de signaux (continu, onde carrée, rampe, triangulaire, sinusoïdal, impulsion).
- Fenêtre d'oscilloscope à 3 traces avec commande continue, simple et de déclenchement.
- Fenêtre de l'enregistreur de graphiques à 4 canaux.
- Fenêtre avec commandes E/S pour le réglage et la visualisation des signaux.

GÉNÉRATEUR DE FONCTIONS



OSCILLOSCOPE 4 canaux





EN

Automatic Control Theory Fundamentals

Before facing the experimental development relevant to Processes, Controllers, the Continuous and Discontinuous Automatic Regulation technique, up to the analysis of specific Process Controls, it is useful to provide a synthesis of the basic concepts relevant to the "Automatic Control Technology", that are necessary for a correct understanding of what will be stated with didactic system:

Level control,
Flow control,
Temperature control,
Dc Motor & Generator control
Simulated controlled system.



FR

Principes fondamentaux de la théorie de la commande automatique

Avant d'aborder le développement expérimental relatif aux processus, aux contrôleurs, à la technique de régulation automatique continue et discontinue, jusqu'à l'analyse de contrôles de processus spécifiques, il est utile de fournir une synthèse des concepts de base relatifs à la "technologie de la régulation automatique", qui sont nécessaires pour une compréhension correcte de ce qui sera exposé avec le système didactique :

Contrôle du niveau,
Contrôle du débit,
Contrôle de température,
Contrôle de moteur et de générateur à courant continu
Système de contrôle simulé .



1.1 Automatic Control Theory

Control theory deals with the control of dynamical systems in engineered processes and machines. **The objective is to develop a model or algorithm governing the application of system inputs to drive the system to a desired state**, while minimizing any delay, overshoot, or steady-state error and ensuring a level of control stability; often with the aim to achieve a degree of optimality.

To do this, a controller with the requisite corrective behaviour is required. This controller monitors the controlled process variable (PV), and compares it with the reference or set point (SP). The difference between actual and desired value of the process variable, called *the error signal*, or SP-PV error, is applied as *feedback* to generate a control action to bring the controlled process variable to the same value as the set point. Other aspects which are also studied are controllability and observability.

This is the basis for the advanced type of automation that revolutionized manufacturing, aircraft, communications and other industries. This is *'feedback control'*, which involves taking measurements using a sensor and making calculated adjustments to keep the measured variable within a set range by means of a *"final control element"*, or "actuators" or "output transducers" such as a control valve. Extensive use is usually made of a diagrammatic style known as the block diagram. In it the *transfer function*, also known as the system function, is a mathematical model of the relation between the input and output based on the differential equations describing the system.

Control theory dates from the 19th century, when the theoretical basis for the operation of governors was first described by James Clerk Maxwell. Control theory was further advanced by Edward Routh in 1874, Charles Sturm and in 1895, Adolf Hurwitz, who all contributed to the establishment of control stability criteria; and from 1922 onwards, the development of PID control theory by Nicolas Minorsky.

Although a major application of mathematical control theory is in control systems engineering, which deals with the design of process control systems for industry, other applications range far beyond this. As the general theory of feedback systems, control theory is useful wherever feedback occurs - thus control theory also has applications in life sciences, computer engineering, sociology and operation research.

- Théorie de la commande automatique

La théorie de la commande traite de la commande des systèmes dynamiques dans les processus et les machines. L'objectif est de développer un modèle ou un algorithme régissant l'application des entrées du système afin de conduire le système à un état souhaité, tout en minimisant tout retard, dépassement ou erreur en régime permanent et en assurant un niveau de stabilité de la commande ; souvent dans le but d'atteindre un degré d'optimalité.

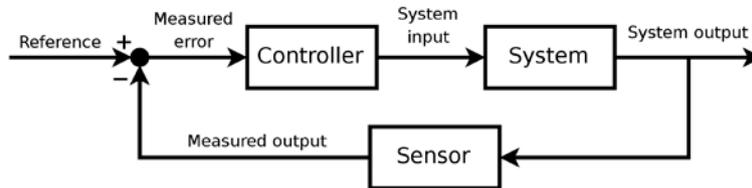
Pour ce faire, il faut un contrôleur doté du comportement correctif requis. Ce contrôleur surveille la variable de processus contrôlée (PV) et la compare à la référence ou au point de consigne (SP). La différence entre la valeur réelle et la valeur souhaitée de la variable du processus, appelée signal d'erreur ou erreur SP-PV, est appliquée comme rétroaction pour générer une action de contrôle afin d'amener la variable du processus contrôlée à la même valeur que le point de consigne. D'autres aspects qui sont également étudiés sont la contrôlabilité et l'observabilité. C'est la base du type d'automatisation avancée qui a révolutionné la fabrication, l'aéronautique, les communications et d'autres industries. Il s'agit de la "commande par rétroaction", qui consiste à prendre des mesures à l'aide d'un capteur et à effectuer des ajustements calculés pour maintenir la variable mesurée dans une plage définie au moyen d'un "élément de commande final", d'"actionneurs" ou de "transducteurs de sortie" tels qu'une vanne de régulation.

On utilise généralement un style de diagramme connu sous le nom de schéma fonctionnel. La fonction de transfert, également appelée fonction du système, est un modèle mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie, basé sur les équations différentielles décrivant le système.

La théorie de la régulation remonte au XIXe siècle, lorsque James Clerk Maxwell a décrit pour la première fois la base théorique du fonctionnement des régulateurs. La théorie de la régulation a ensuite été développée par Edward Routh en 1874, Charles Sturm et Adolf Hurwitz en 1895, qui ont tous contribué à l'établissement de critères de stabilité de la régulation. À partir de 1922, Nicolas Minorsky a développé la théorie de la régulation PID..

Bien que l'une des principales applications de la théorie mathématique du contrôle soit l'ingénierie des systèmes de contrôle, qui traite de la conception de systèmes de contrôle de processus pour l'industrie, d'autres applications vont bien au-delà. En tant que théorie générale des systèmes de rétroaction, la théorie du contrôle est utile partout où la rétroaction se produit - ainsi la théorie du contrôle a également des applications

dans les sciences de la vie, l'ingénierie informatique, la sociologie et la recherche opérationnelle.



1.1.2 Open-loop and closed-loop control

Fundamentally, there are two types of control loops: open loop control and closed loop (feedback) control.

In open loop control, the control action from the controller is independent of the "process output" (or "controlled process variable" - PV). A good example of this is a central heating boiler controlled only by a timer, so that heat is applied for a constant time, regardless of the temperature of the building. The control action is the timed switching on/off of the boiler, the process variable is the building temperature, but neither is linked.

In closed loop control, the control action from the controller is dependent on feedback from the process in the form of the value of the process variable (PV). In the case of the boiler analogy, a closed loop would include a thermostat to compare the building temperature (PV) with the temperature set on the thermostat (the set point - SP). This generates a controller output to maintain the building at the desired temperature by switching the boiler on and off. A closed loop controller, therefore, has a feedback loop which ensures the controller exerts a control action to manipulate the process variable to be the same as the "Reference input" or "set point". For this reason, closed loop controllers are also called feedback controllers.

The definition of a closed loop control system according to the British Standard Institution is "a control system possessing monitoring feedback, the deviation signal formed as a result of this feedback being used to control the action of a final control element in such a way as to tend to reduce the deviation to zero."

Likewise; "A Feedback Control System is a system which tends to maintain a prescribed

Contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée (feedback)

Il existe fondamentalement deux types de boucles de régulation : la régulation en boucle ouverte et la régulation en boucle fermée (rétroaction).

Dans le cas d'une commande en boucle ouverte, l'action de commande du contrôleur est indépendante de la "sortie du processus" (ou "variable de processus contrôlée" - PV). Un bon exemple est une chaudière de chauffage central commandée uniquement par une minuterie, de sorte que la chaleur est appliquée pendant une durée constante, quelle que soit la température du bâtiment. L'action de contrôle est la mise en marche/arrêt de la chaudière, la variable de processus est la température du bâtiment, mais aucune des deux n'est liée.

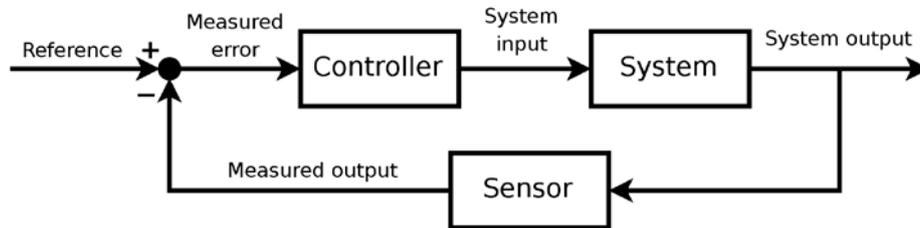
Dans le cas d'un contrôle en boucle fermée, l'action de contrôle du contrôleur dépend du retour d'information du processus sous la forme de la valeur de la variable du processus (PV). Dans le cas de l'analogie avec la chaudière, une boucle fermée comprendrait un thermostat pour comparer la température du bâtiment (PV) avec la température réglée sur le thermostat (le point de consigne - SP). Cela génère une sortie de contrôleur pour maintenir le bâtiment à la température désirée en allumant et en éteignant la chaudière. Un régulateur à boucle fermée possède donc une boucle de rétroaction qui garantit que le régulateur exerce une action de contrôle pour manipuler la variable du processus afin qu'elle soit identique à l'"entrée de référence" ou au "point de consigne". Pour cette raison, les régulateurs à boucle fermée sont également appelés régulateurs à rétroaction..

La définition d'un système de contrôle en boucle fermée selon la British Standard Institution est la suivante : "un système de contrôle possédant une rétroaction de surveillance, le signal de déviation formé à la suite de cette rétroaction étant utilisé pour contrôler l'action d'un élément de contrôle final de manière à tendre à réduire la déviation à zéro".

De même, "un système de contrôle par rétroaction est

relationship of one system variable to another by comparing functions of these variables and using the difference as a means of control."

un système qui tend à maintenir une relation prescrite d'une variable du système à une autre en comparant les fonctions de ces variables et en utilisant la différence comme moyen de contrôle".



A block diagram of a negative feedback control system using a feedback loop to control the process variable by comparing it with a desired value, and applying the difference as an error signal to generate a control output to reduce or eliminate the error.

Schéma fonctionnel d'un système de commande à rétroaction négative utilisant une boucle de rétroaction pour commander la variable de processus en la comparant à une valeur souhaitée, et en appliquant la différence comme signal d'erreur pour générer une sortie de commande afin de réduire ou d'éliminer l'erreur.

An example of a control system is a car's cruise control, which is a device designed to maintain vehicle speed at a constant desired or reference speed provided by the driver. The controller is the cruise control, the plant is the car, and the system is the car and the cruise control. The system output is the car's speed, and the control itself is the engine's throttle position which determines how much power the engine delivers.

A primitive way to implement cruise control is simply to lock the throttle position when the driver engages cruise control. However, if the cruise control is engaged on a stretch of non-flat road, then the car will travel slower going uphill and faster when going downhill. This type of controller is called an open-loop controller because there is no feedback; no measurement of the system output (the car's speed) is used to alter the control (the throttle position.) As a result, the controller cannot compensate for changes acting on the car, like a change in the slope of the road.

In a closed-loop control system, data from a sensor monitoring the car's speed (the system output) enters a controller which continuously compares the quantity representing the speed with the reference quantity representing the desired speed. The difference, called the error, determines the throttle position (the control). The result is to match the car's speed to the

Un exemple de système de contrôle est le régulateur de vitesse d'une voiture, qui est un dispositif conçu pour maintenir la vitesse du véhicule à une vitesse constante souhaitée ou de référence fournie par le conducteur. Le contrôleur est le régulateur de vitesse, l'installation est la voiture, et le système est la voiture et le régulateur de vitesse. La sortie du système est la vitesse de la voiture, et la commande elle-même est la position de l'accélérateur du moteur qui détermine la puissance du moteur.

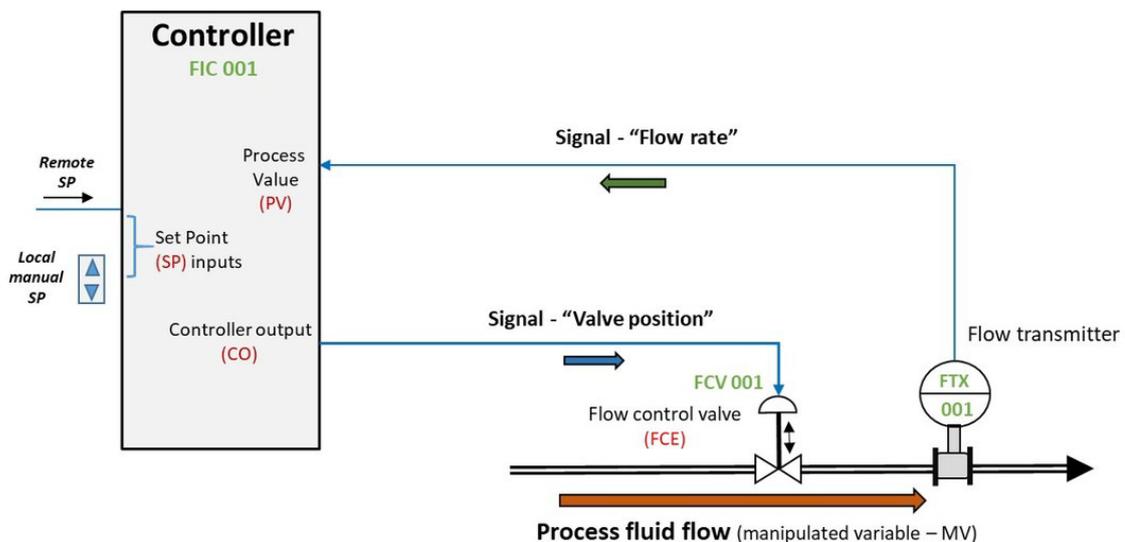
Une façon primitive de mettre en œuvre le régulateur de vitesse consiste simplement à verrouiller la position de l'accélérateur lorsque le conducteur enclenche le régulateur de vitesse. Cependant, si le régulateur de vitesse est engagé sur un tronçon de route non plat, la voiture se déplacera plus lentement en montée et plus rapidement en descente. Ce type de régulateur est appelé régulateur en boucle ouverte car il n'y a pas de retour d'information ; aucune mesure de la sortie du système (la vitesse de la voiture) n'est utilisée pour modifier la commande (la position de l'accélérateur).

Dans un système de commande en boucle fermée, les données d'un capteur surveillant la vitesse de la voiture (la sortie du système) entrent dans un contrôleur qui compare en permanence la quantité représentant la vitesse avec la quantité de référence représentant la vitesse souhaitée. La différence, appelée erreur, détermine la position du papillon des gaz (la commande). Le résultat est de faire

reference speed (maintain the desired system output). Now, when the car goes uphill, the difference between the input (the sensed speed) and the reference continuously determines the throttle position. As the sensed speed drops below the reference, the difference increases, the throttle opens, and engine power increases, speeding up the vehicle. In this way, the controller dynamically counteracts changes to the car's speed. The central idea of these control systems is the feedback loop, the controller affects the system output, which in turn is measured and fed back to the controller.

correspondre la vitesse de la voiture à la vitesse de référence (maintenir la sortie souhaitée du système). Maintenant, lorsque la voiture monte une côte, la différence entre l'entrée (la vitesse détectée) et la référence détermine en permanence la position de l'accélérateur. Lorsque la vitesse détectée passe en dessous de la référence, la différence augmente, le papillon des gaz s'ouvre et la puissance du moteur augmente, ce qui accélère le véhicule. De cette façon, le contrôleur contrebalance dynamiquement les changements de vitesse de la voiture. L'idée centrale de ces systèmes de contrôle est la boucle de rétroaction, le contrôleur affecte la sortie du système, qui à son tour est mesurée et renvoyée au contrôleur.

Industrial process control loop



The basic building block of industrial process control systems is the "control loop" which contains all the elements to measure and control a process value at a desired setpoint. The controller may be a discrete piece of hardware, or a function within a large computerised DCS, SCADA or PLC system. Set points can be manually set locally or cascaded from another source.

An example is shown of a flow controller, with a flow transmitter and a control valve. The green text are "tags", which describe the function and identify the equipment. As each loop has a unique number the tags are unique within a plant to prevent confusion. In this case:

FIC = Flow indicating controller, **FCV** = Flow Control Valve, **FTX** = flow transmitter.

Standard practical control nomenclature is: **SP** = process set point, **PV** = process value, **CO** = controller output, **FCE** = final control element, **MV** = manipulated variable.

To overcome the limitations of the open-loop controller, control theory introduces feedback.

A closed-loop controller uses feedback to control states or outputs of a dynamical system. Its name comes from the information path in the system: process inputs (e.g., voltage applied to an electric motor) have an effect on the process outputs (e.g., speed or torque of the motor), which is measured with

Pour surmonter les limites du contrôleur en boucle ouverte, la théorie du contrôle introduit la rétroaction.

Un contrôleur en boucle fermée utilise la rétroaction pour contrôler les états ou les sorties d'un système dynamique. Son nom provient du chemin de l'information dans le système : les entrées du processus (par exemple, la tension appliquée à un moteur électrique) ont un effet sur les sorties du processus (par exemple, la vitesse ou le couple du moteur), qui est mesuré par des capteurs et traité par le

sensors and processed by the controller; the result (the control signal) is "fed back" as input to the process, closing the loop.

Closed-loop controllers have the following advantages over open-loop controllers:

- disturbance rejection (such as hills in the cruise control example above)
- guaranteed performance even with model uncertainties, when the model structure does not match perfectly the real process and the model parameters are not exact
- unstable processes can be stabilized
- reduced sensitivity to parameter variations
- improved reference tracking performance

In some systems, closed-loop and open-loop control are used simultaneously. In such systems, the open-loop control is termed feedforward and serves to further improve reference tracking performance.

A common closed-loop controller architecture is the PID controller.

The output of the system $y(t)$ is fed back through a sensor measurement F to a comparison with the reference value $r(t)$. The controller C then takes the error e (difference) between the reference and the output to change the inputs u to the system under control P . This is shown in the figure. This kind of controller is a closed-loop controller or feedback controller.

This is called a single-input-single-output (SISO) control system; MIMO (i.e., Multi-Input-Multi-Output) systems, with more than one input/output, are common. In such cases variables are represented through vectors instead of simple scalar values. For some distributed parameter systems the vectors may be infinite-dimensional (typically functions).

contrôleur ; le résultat (le signal de commande) est "réinjecté" comme entrée dans le processus, ce qui ferme la boucle.

Les régulateurs en boucle fermée présentent les avantages suivants par rapport aux régulateurs en boucle ouverte :

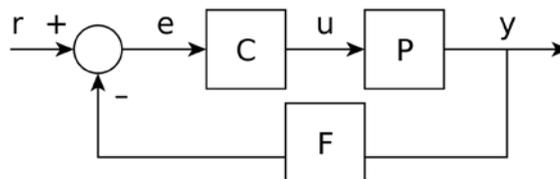
- rejet des perturbations (comme les collines dans l'exemple du régulateur de vitesse ci-dessus)
- performances garanties même avec des incertitudes de modèle, lorsque la structure du modèle ne correspond pas parfaitement au processus réel et que les paramètres du modèle ne sont pas exacts
- les processus instables peuvent être stabilisés
- sensibilité réduite aux variations des paramètres
- amélioration des performances de suivi de la référence

Dans certains systèmes, la commande en boucle fermée et la commande en boucle ouverte sont utilisées simultanément. Dans de tels systèmes, la commande en boucle ouverte est appelée feedforward et sert à améliorer encore les performances de suivi de la référence.

Le régulateur PID est une architecture courante de régulateur en boucle fermée.

La sortie du système $y(t)$ est renvoyée par un capteur de mesure F pour être comparée à la valeur de référence $r(t)$. Le contrôleur C prend alors l'erreur e (différence) entre la référence et la sortie pour modifier les entrées u du système sous contrôle P . Ceci est illustré sur la figure. Ce type de contrôleur est un contrôleur en boucle fermée ou un contrôleur à rétroaction.

Il s'agit d'un système de commande à entrée unique et à sortie unique (SISO) ; les systèmes MIMO (c'est-à-dire à entrées multiples et à sorties multiples), avec plus d'une entrée/sortie, sont courants. Dans ces cas, les variables sont représentées par des vecteurs au lieu de simples valeurs scalaires. Pour certains systèmes à paramètres distribués, les vecteurs peuvent être de dimension infinie (généralement des fonctions).



If we assume the controller C , the plant P , and the sensor F are linear and time-invariant (i.e., elements of their transfer function $C(s)$, $P(s)$, and $F(s)$ do not depend on time), the systems above can be analysed using the Laplace transform on the variables.

Si nous supposons que le contrôleur C , l'usine P et le capteur F sont linéaires et invariants dans le temps (c'est-à-dire que les éléments de leur fonction de transfert $C(s)$, $P(s)$ et $F(s)$ ne dépendent pas du temps), les systèmes ci-dessus peuvent être analysés en utilisant la transformée de Laplace sur les variables.

1.1.3 PID feedback control overview

A proportional–integral–derivative controller (PID controller) is a control loop feedback mechanism control technique widely used in control systems.

A PID controller continuously calculates an error value $e(t)$ as the difference between a desired setpoint and a measured process variable and applies a correction based on proportional, integral, and derivative terms. PID is an initialism for Proportional-Integral-Derivative, referring to **the three terms operating on the error signal to produce a control signal.**

The theoretical understanding and application dates from the 1920s, and they are implemented in nearly all analogue control systems; originally in mechanical controllers, and then using discrete electronics and later in industrial process computers. The PID controller is probably the most-used feedback control design.

At next figure we name $u(t)$ is the control signal sent to the system, $y(t)$ is the measured output and $r(t)$ is the desired output, and $e(t) = r(t) - y(t)$ is the tracking error

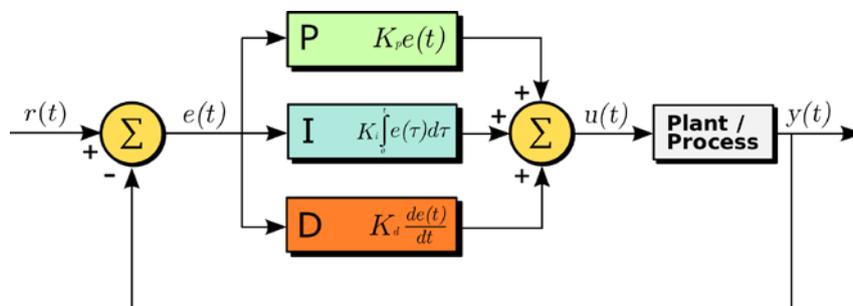
Aperçu de la commande de rétroaction PID

Un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (contrôleur PID) est une technique de contrôle par mécanisme de rétroaction de boucle de contrôle largement utilisée dans les systèmes de contrôle.

Un contrôleur PID calcule en permanence une valeur d'erreur $e(t)$ comme étant la différence entre un point de consigne souhaité et une variable de processus mesurée et applique une correction basée sur des termes proportionnels, intégraux et dérivés. PID est l'acronyme de Proportionnel-Intégral-Dérivé, faisant référence aux trois termes qui agissent sur le signal d'erreur pour produire un signal de contrôle.

Leur compréhension théorique et leur application datent des années 1920 et ils sont mis en œuvre dans presque tous les systèmes de contrôle analogiques, à l'origine dans des contrôleurs mécaniques, puis en utilisant l'électronique discrète et plus tard dans des ordinateurs de processus industriels. Le régulateur PID est probablement la conception de contrôle à rétroaction la plus utilisée.

Dans la figure suivante, nous nommons $u(t)$ le signal de commande envoyé au système, $y(t)$ la sortie mesurée et $r(t)$ la sortie souhaitée, et $e(t) = r(t) - y(t)$ l'erreur de suivi.



A block diagram of a PID controller in a feedback loop, $r(t)$ is the desired process value or "set point", and $y(t)$ is the measured process value.

The desired closed loop dynamics is obtained by adjusting the three parameters K_P , K_I and K_D , often iteratively by "tuning" and without specific knowledge of a plant model. Stability can often be ensured using only the proportional term. The integral term permits the rejection of a step disturbance (often a striking specification in process control). The derivative term is used to provide *damping or shaping* of the response.

Schéma fonctionnel d'un régulateur PID dans une boucle de rétroaction, $r(t)$ est la valeur souhaitée du processus ou "point de consigne", et $y(t)$ est la valeur mesurée du processus.

La dynamique souhaitée en boucle fermée est obtenue en ajustant les trois paramètres K_P , K_I et K_D , souvent de manière itérative par "réglage" et sans connaissance spécifique d'un modèle d'usine. La stabilité peut souvent être assurée en utilisant uniquement le terme proportionnel. Le terme intégral permet de rejeter une perturbation à échelon (souvent une spécification frappante dans le contrôle de processus). Le terme dérivé est utilisé pour fournir un amortissement ou une mise en forme de la réponse.

1.1.4 Linear and nonlinear control theory

Linear control theory – This applies to systems made of devices which obey the superposition principle, which means roughly that the output is proportional to the input. They are governed by linear differential equations. A major subclass is systems which in addition have parameters which do not change with time, called linear time invariant (LTI) systems. These systems are amenable to powerful frequency domain mathematical techniques of great generality, such as the Laplace transform, Fourier transform, Z transform, Bode plot, root locus, and Nyquist stability criterion. These lead to a description of the system using terms like bandwidth, frequency response, eigenvalues, gain, resonant frequencies, zeros and poles, which give solutions for system response and design techniques for most systems of interest.

Nonlinear control theory – This covers a wider class of systems that do not obey the superposition principle, and applies to more real-world systems because **all real control systems are nonlinear**. These systems are often governed by nonlinear differential equations. The few mathematical techniques which have been developed to handle them are more difficult and much less general, often applying only to narrow categories of systems. These include limit cycle theory, Poincaré maps, Lyapunov stability theorem, and describing functions. Nonlinear systems are often analyzed using numerical methods on computers, for example by simulating their operation using a simulation language. If only solutions near a stable point are of interest, nonlinear systems can often be linearized by approximating them by a linear system using perturbation theory, and linear techniques can be used.

Théorie du contrôle linéaire et non linéaire

Théorie du contrôle linéaire - Il s'agit de systèmes composés de dispositifs qui obéissent au principe de superposition, ce qui signifie en gros que la sortie est proportionnelle à l'entrée. Ils sont régis par des équations différentielles linéaires. Une sous-classe importante est celle des systèmes dont les paramètres ne changent pas avec le temps, appelés systèmes linéaires invariants dans le temps (LTI). Ces systèmes se prêtent à de puissantes techniques mathématiques du domaine fréquentiel d'une grande généralité, telles que la transformée de Laplace, la transformée de Fourier, la transformée Z, le tracé de Bode, le lieu des racines et le critère de stabilité de Nyquist. Ces techniques conduisent à une description du système à l'aide de termes tels que largeur de bande, réponse en fréquence, valeurs propres, gain, fréquences de résonance, zéros et pôles, qui donnent des solutions pour la réponse du système et des techniques de conception pour la plupart des systèmes d'intérêt.

Théorie de la commande non linéaire - Elle couvre une classe plus large de systèmes qui n'obéissent pas au principe de superposition et s'applique à un plus grand nombre de systèmes du monde réel, car tous les systèmes de commande réels sont non linéaires. Ces systèmes sont souvent régis par des équations différentielles non linéaires. Les quelques techniques mathématiques qui ont été développées pour les traiter sont plus difficiles et beaucoup moins générales, ne s'appliquant souvent qu'à des catégories étroites de systèmes. Elles comprennent la théorie des cycles limites, les cartes de Poincaré, le théorème de stabilité de Lyapunov et les fonctions descriptives. Les systèmes non linéaires sont souvent analysés par des méthodes numériques sur ordinateur, par exemple en simulant leur fonctionnement à l'aide d'un langage de simulation. Si seules les solutions proches d'un point stable présentent un intérêt, les systèmes non linéaires peuvent souvent être linéarisés en les approximant par un système linéaire à l'aide de la théorie des perturbations, et les techniques linéaires peuvent être utilisées.

1.1.5 Analysis techniques - frequency domain and time domain

Mathematical techniques for analyzing and designing control systems fall into two different categories:

Frequency domain – In this type the values of the state variables, the mathematical variables representing the system's input, output and feedback are represented as functions of frequency. The input signal and the system's transfer function are converted from time

Techniques d'analyse - domaine fréquentiel et domaine temporel

Les techniques mathématiques d'analyse et de conception des systèmes de contrôle se divisent en deux catégories différentes :

Domaine fréquentiel - Dans ce type, les valeurs des variables d'état, les variables mathématiques représentant l'entrée, la sortie et la rétroaction du système, sont représentées comme des fonctions de fréquence. Le signal d'entrée et la fonction de transfert du système sont convertis de fonctions

functions to functions of frequency by a transform such as the Fourier transform, Laplace transform, or Z transform. The advantage of this technique is that it results in a simplification of the mathematics; the differential equations that represent the system are replaced by algebraic equations in the frequency domain which is much simpler to solve. However, frequency domain techniques can only be used with linear systems, as mentioned above.

Time-domain state space representation – In this type the values of the state variables are represented as functions of time. With this model, the system being analyzed is represented by one or more differential equations. Since frequency domain techniques are limited to linear systems, time domain is widely used to analyze real-world nonlinear systems. Although these are more difficult to solve, modern computer simulation techniques such as simulation languages have made their analysis routine.

In contrast to the frequency domain analysis of the classical control theory, modern control theory utilizes the time-domain state space representation, a mathematical model of a physical system as a set of input, output and state variables related by first-order differential equations. To abstract from the number of inputs, outputs, and states, the variables are expressed as vectors and the differential and algebraic equations are written in matrix form (the latter only being possible when the dynamical system is linear). The state space representation (also known as the "time-domain approach") provides a convenient and compact way to model and analyze systems with multiple inputs and outputs. With inputs and outputs, we would otherwise have to write down Laplace transforms to encode all the information about a system. Unlike the frequency domain approach, the use of the state-space representation is not limited to systems with linear components and zero initial conditions. "State space" refers to the space whose axes are the state variables. The state of the system can be represented as a point within that space.

temporelles en fonctions de fréquence par une transformée telle que la transformée de Fourier, la transformée de Laplace ou la transformée en Z. L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'obtenir des informations sur l'état du système. L'avantage de cette technique est qu'elle entraîne une simplification des mathématiques ; les équations différentielles qui représentent le système sont remplacées par des équations algébriques dans le domaine fréquentiel, ce qui est beaucoup plus simple à résoudre. Cependant, les techniques du domaine fréquentiel ne peuvent être utilisées qu'avec des systèmes linéaires, comme mentionné ci-dessus.

Représentation de l'espace d'état dans le domaine temporel - Dans ce type, les valeurs des variables d'état sont représentées comme des fonctions du temps. Avec ce modèle, le système analysé est représenté par une ou plusieurs équations différentielles. Les techniques du domaine fréquentiel étant limitées aux systèmes linéaires, le domaine temporel est largement utilisé pour analyser les systèmes non linéaires du monde réel. Bien que ces derniers soient plus difficiles à résoudre, les techniques modernes de simulation informatique telles que les langages de simulation ont rendu leur analyse routinière.

Contrairement à l'analyse dans le domaine fréquentiel de la théorie classique de la commande, la théorie moderne de la commande utilise la représentation de l'espace d'état dans le domaine temporel, un modèle mathématique d'un système physique comme un ensemble de variables d'entrée, de sortie et d'état liées par des équations différentielles du premier ordre. Pour faire abstraction du nombre d'entrées, de sorties et d'états, les variables sont exprimées sous forme de vecteurs et les équations différentielles et algébriques sont écrites sous forme de matrice (cette dernière possibilité n'étant possible que lorsque le système dynamique est linéaire). La représentation de l'espace d'état (également connue sous le nom d'"approche du domaine temporel") offre un moyen pratique et compact de modéliser et d'analyser des systèmes à entrées et sorties multiples. Avec des entrées et des sorties, nous devrions autrement écrire des transformées de Laplace pour encoder toutes les informations sur un système. Contrairement à l'approche du domaine fréquentiel, l'utilisation de la représentation de l'espace d'état n'est pas limitée aux systèmes à composantes linéaires et aux conditions initiales nulles. "L'espace d'état" désigne l'espace dont les axes sont les variables d'état. L'état du système peut être représenté comme un point dans cet espace.

1.1.6 System interfacing - SISO & MIMO

Control systems can be divided into different categories depending on the number of inputs and outputs.

Single-input single-output (SISO) – This is the simplest and most common type, in which one output is controlled by one control signal. Examples are the cruise control example above, or an audio system, in which the control input is the input audio signal and the output is the sound waves from the speaker.

Multiple-input multiple-output (MIMO) – These are found in more complicated systems. For example, modern large telescopes such as the Keck and MMT have mirrors composed of many separate segments each controlled by an actuator. The shape of the entire mirror is constantly adjusted by a MIMO active optics control system using input from multiple sensors at the focal plane, to compensate for changes in the mirror shape due to thermal expansion, contraction, stresses as it is rotated and distortion of the wavefront due to turbulence in the atmosphere. Complicated systems such as nuclear reactors and human cells are simulated by a computer as large MIMO control systems.

Interfaçage de systèmes - SISO & MIMO

Les systèmes de commande peuvent être divisés en différentes catégories en fonction du nombre d'entrées et de sorties.

Entrée unique, sortie unique (SISO) - Il s'agit du type le plus simple et le plus courant, dans lequel une sortie est contrôlée par un seul signal de commande. On peut citer l'exemple du régulateur de vitesse ci-dessus, ou un système audio, dans lequel l'entrée de commande est le signal audio d'entrée et la sortie est constituée par les ondes sonores du haut-parleur.

Entrées multiples, sorties multiples (MIMO) - On les trouve dans des systèmes plus complexes. Par exemple, les grands télescopes modernes tels que le Keck et le MMT ont des miroirs composés de nombreux segments séparés, chacun étant contrôlé par un actionneur. La forme de l'ensemble du miroir est constamment ajustée par un système de commande d'optique active MIMO à l'aide des données fournies par de multiples capteurs au niveau du plan focal, afin de compenser les changements de forme du miroir dus à la dilatation thermique, à la contraction, aux contraintes lors de la rotation et à la distorsion du front d'onde due aux turbulences atmosphériques. Les systèmes complexes tels que les réacteurs nucléaires et les cellules humaines sont simulés par un ordinateur comme de grands systèmes de contrôle MIMO.

1.1.7 Stability

The stability of a general dynamical system with no input can be described with Lyapunov stability criteria.

A linear system is called bounded-input bounded-output (BIBO) stable if its output will stay bounded for any bounded input.

Stability for nonlinear systems that take an input is input-to-state stability (ISS), which combines Lyapunov stability and a notion similar to BIBO stability.

For simplicity, the following descriptions focus on continuous-time and discrete-time linear systems.

Mathematically, this means that for a causal linear system to be stable all of the poles of its transfer function must have negative-real values, i.e. the real part of each pole must be less than zero. Practically speaking, stability requires that the transfer function complex poles reside in the open left half of the complex plane for continuous time, when the Laplace transform is used to obtain the transfer function inside the unit circle for discrete time, when the Z-transform is used.

Stabilité

La stabilité d'un système dynamique général sans entrée peut être décrite à l'aide de critères de stabilité de Lyapunov.

Un système linéaire est appelé stable BIBO (bounded-input bounded-output) si sa sortie reste bornée pour toute entrée bornée.

La stabilité des systèmes non linéaires qui prennent une entrée est la stabilité entrée-état (ISS), qui combine la stabilité de Lyapunov et une notion similaire à la stabilité BIBO.

Pour des raisons de simplicité, les descriptions suivantes se concentrent sur les systèmes linéaires à temps continu et à temps discret.

Mathématiquement, cela signifie que pour qu'un système linéaire causal soit stable, tous les pôles de sa fonction de transfert doivent avoir des valeurs réelles négatives, c'est-à-dire que la partie réelle de chaque pôle doit être inférieure à zéro. En pratique, la stabilité exige que les pôles complexes de la fonction de transfert résident dans la moitié gauche ouverte du plan complexe pour le temps continu, lorsque la transformée de Laplace est utilisée pour obtenir la fonction de transfert à l'intérieur du cercle unitaire pour le temps discret, lorsque la transformée en Z

The difference between the two cases is simply due to the traditional method of plotting continuous time versus discrete time transfer functions. The continuous Laplace transform is in Cartesian coordinates where the s axis is the real axis and the discrete Z-transform is in circular coordinates where the p axis is the real axis.

When the appropriate conditions above are satisfied a system is said to be asymptotically stable; the variables of an asymptotically stable control system always decrease from their initial value and do not show permanent oscillations. Permanent oscillations occur when a pole has a real part exactly equal to zero (in the continuous time case) or a modulus equal to one (in the discrete time case). If a simply stable system response neither decays nor grows over time, and has no oscillations, it is marginally stable; in this case the system transfer function has non-repeated poles at the complex plane origin (i.e. their real and complex component is zero in the continuous time case). Oscillations are present when poles with real part equal to zero have an imaginary part not equal to zero.

est utilisée.

La différence entre les deux cas est simplement due à la méthode traditionnelle de traçage des fonctions de transfert en temps continu et en temps discret. La transformée de Laplace continue est en coordonnées cartésiennes où l'axe est l'axe réel et la transformée Z discrète est en coordonnées circulaires où l'axe p est l'axe réel.

Lorsque les conditions appropriées ci-dessus sont satisfaites, on dit qu'un système est asymptotiquement stable ; les variables d'un système de commande asymptotiquement stable diminuent toujours à partir de leur valeur initiale et ne présentent pas d'oscillations permanentes. Les oscillations permanentes se produisent lorsqu'un pôle a une partie réelle exactement égale à zéro (dans le cas du temps continu) ou un module égal à un (dans le cas du temps discret). Si la réponse d'un système simplement stable ne décroît ni ne croît avec le temps, et ne présente pas d'oscillations, il est marginalement stable ; dans ce cas, la fonction de transfert du système présente des pôles non répétés à l'origine du plan complexe (c'est-à-dire que leur composante réelle et complexe est nulle dans le cas du temps continu). Les oscillations sont présentes lorsque les pôles dont la partie réelle est égale à zéro ont une partie imaginaire non égale à zéro.

1.2 PID controller

The distinguishing feature of the PID controller is the ability to use the three control terms of proportional, integral and derivative influence on the controller output to apply accurate and optimal control. The block diagram shows the principles of how these terms are generated and applied. It shows a PID controller, which continuously calculates an error value $e(t)$ as the difference between a desired setpoint $SP=r(t)$ and a measured process variable $PV=y(t)$: $e(t)=r(t)-y(t)$

and applies a correction based on proportional, integral, and derivative terms. The controller attempts to minimize the error over time by adjustment of a control variable $u(t)$, such as the opening of a control valve, to a new value determined by a weighted sum of the control terms.

In this model:

Term P is proportional to the current value of the $SP - PV$ error $e(t)$. For example, if the error is large and positive, the control output will be proportionately large and positive, taking into account the gain factor "K". Using proportional control alone will result in an error between the setpoint and the actual process value because it requires an error to generate the proportional response. If there is no error, there is no corrective response.

Term I accounts for past values of the $SP - PV$ error and integrates them over time to produce the I term. For example, if there is a residual $SP - PV$ error after the application of proportional control, the integral term seeks to eliminate the residual error by adding a control effect due to the historic cumulative value of the error. When the error is eliminated, the integral term will cease to grow. This will result in the proportional effect diminishing as the error decreases, but this is compensated for by the growing integral effect.

Term D is a best estimate of the future trend of the $SP - PV$ error, based on its current rate of change. It is sometimes called "anticipatory control", as it is effectively seeking to reduce the effect of the $SP - PV$ error by exerting a control influence generated by the rate of error change. The more rapid the change, the greater the controlling or damping effect.

Tuning – The balance of these effects is achieved by loop tuning to produce the optimal control function. The tuning constants are shown below as "K" and must be derived for

Régulateur PID

La caractéristique distinctive du régulateur PID est la capacité d'utiliser les trois termes de contrôle de l'influence proportionnelle, intégrale et dérivée sur la sortie du régulateur pour appliquer un contrôle précis et optimal. Le schéma fonctionnel montre les principes de génération et d'application de ces termes. Il montre un régulateur PID, qui calcule en permanence une valeur d'erreur $e(t)$ comme la différence entre un point de consigne souhaité $SP=r(t)$ et une variable de processus mesurée $PV=y(t)$: $e(t)=r(t)-y(t)$

et applique une correction basée sur les termes proportionnel, intégral et dérivé. Le contrôleur tente de minimiser l'erreur dans le temps en ajustant une variable de contrôle $u(t)$, telle que l'ouverture d'une vanne de contrôle, à une nouvelle valeur déterminée par une somme pondérée des termes de contrôle.

Dans ce modèle :

Le terme P est proportionnel à la valeur actuelle de l'erreur $SP - PV$ $e(t)$. Par exemple, si l'erreur est importante et positive, la sortie de commande sera proportionnellement importante et positive, en tenant compte du facteur de gain "K". L'utilisation d'une commande proportionnelle seule entraînera une erreur entre le point de consigne et la valeur réelle du processus car il faut une erreur pour générer la réponse proportionnelle. S'il n'y a pas d'erreur, il n'y a pas de réponse corrective.

Le terme I tient compte des valeurs passées de l'erreur $SP - PV$ et les intègre dans le temps pour produire le terme I. Par exemple, s'il existe une erreur $SP - PV$ résiduelle après l'application d'une commande proportionnelle, le terme intégral cherche à éliminer l'erreur résiduelle en ajoutant un effet de contrôle dû à la valeur cumulative historique de l'erreur. Lorsque l'erreur est éliminée, le terme intégral cesse de croître. Il en résulte que l'effet proportionnel diminue à mesure que l'erreur diminue, mais cela est compensé par l'effet intégral croissant.

Le terme D est la meilleure estimation de la tendance future de l'erreur $SP - PV$, basée sur son taux de variation actuel. Il est parfois appelé "contrôle anticipé", car il cherche effectivement à réduire l'effet de l'erreur $SP - PV$ en exerçant une influence de contrôle générée par le taux de variation de l'erreur. Plus le changement est rapide, plus l'effet de contrôle ou d'amortissement est important.

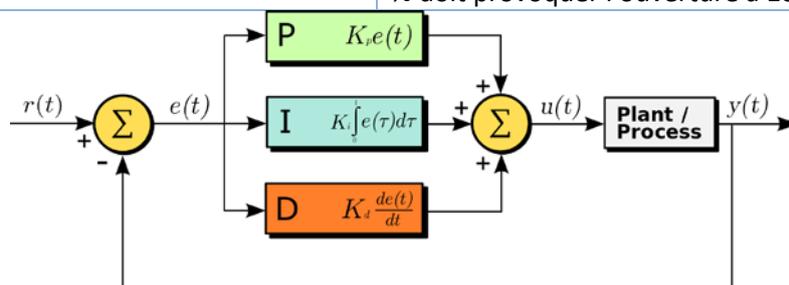
Réglage - L'équilibre de ces effets est obtenu par le

each control application, as they depend on the response characteristics of the complete loop external to the controller. These are dependent on the behavior of the measuring sensor, the final control element (such as a control valve), any control signal delays and the process itself. Approximate values of constants can usually be initially entered knowing the type of application, but they are normally refined, or tuned, by "bumping" the process in practice by introducing a setpoint change and observing the system response.

Control action – The mathematical model and practical loop above both use a direct control action for all the terms, which means an increasing positive error results in an increasing positive control output correction. The system is called reverse acting if it is necessary to apply negative corrective action. For instance, if the valve in the flow loop was 100–0% valve opening for 0–100% control output – meaning that the controller action has to be reversed. Some process control schemes and final control elements require this reverse action. An example would be a valve for cooling water, where the fail-safe mode, in the case of loss of signal, would be 100% opening of the valve; therefore 0% controller output needs to cause 100% valve opening.

réglage de la boucle pour produire la fonction de contrôle optimale. Les constantes de réglage sont indiquées ci-dessous par "K" et doivent être dérivées pour chaque application de contrôle, car elles dépendent des caractéristiques de réponse de la boucle complète externe au contrôleur. Celles-ci dépendent du comportement du capteur de mesure, de l'élément de contrôle final (tel qu'une vanne de contrôle), de tout retard du signal de contrôle et du processus lui-même. Des valeurs approximatives de constantes peuvent généralement être saisies initialement en connaissant le type d'application, mais elles sont normalement affinées, ou accordées, en "secouant" le processus en pratique en introduisant un changement de point de consigne et en observant la réponse du système.

Action de contrôle - Le modèle mathématique et la boucle pratique ci-dessus utilisent tous deux une action de contrôle directe pour tous les termes, ce qui signifie qu'une erreur positive croissante entraîne une correction positive croissante de la sortie de contrôle. Le système est dit à action inverse s'il est nécessaire d'appliquer une action corrective négative. Par exemple, si la vanne de la boucle d'écoulement avait une ouverture de 100-0% pour une sortie de contrôle de 0-100% - ce qui signifie que l'action du contrôleur doit être inversée. Certains schémas de contrôle de processus et éléments de contrôle final nécessitent cette action inverse. Un exemple serait une vanne pour l'eau de refroidissement, où le mode de sécurité, en cas de perte de signal, serait l'ouverture à 100 % de la vanne ; par conséquent, une sortie de contrôleur de 0 % doit provoquer l'ouverture à 100 % de la vanne.



Although a PID controller has three control terms, some applications need only one or two terms to provide appropriate control. This is achieved by setting the unused parameters to zero and is called a PI, PD, P or I controller in the absence of the other control actions. PI controllers are fairly common in applications where derivative action would be sensitive to measurement noise, but the integral term is often needed for the system to reach its target value.

Alors qu'un régulateur PID comporte trois termes de contrôle, certaines applications ne nécessitent qu'un ou deux termes pour fournir un contrôle approprié. On y parvient en mettant à zéro les paramètres non utilisés et on parle alors de régulateur PI, PD, P ou I en l'absence des autres actions de contrôle. Les régulateurs PI sont assez courants dans les applications où l'action dérivée serait sensible au bruit de mesure, mais le terme intégral est souvent nécessaire pour que le système atteigne sa valeur cible.

The use of the PID algorithm does not guarantee optimal control of the system or its control stability. Situations may occur where there are excessive delays: the measurement of the process value is delayed, or the control action does not apply quickly enough. In these cases lead-lag compensation is required to be effective. The response of the controller can be described in terms of its responsiveness to an error, the degree to which the system overshoots a setpoint, and the degree of any system oscillation. But the PID controller is broadly applicable since it relies only on the response of the measured process variable, not on knowledge or a model of the underlying process.

L'utilisation de l'algorithme PID ne garantit pas un contrôle optimal du système ni sa stabilité. Il peut se produire des situations où les retards sont excessifs : la mesure de la valeur du processus est retardée, ou l'action de contrôle ne s'applique pas assez rapidement. Dans ces cas, une compensation de type lead-lag est nécessaire pour être efficace. La réponse du contrôleur peut être décrite en termes de réactivité à une erreur, de degré de dépassement d'un point de consigne par le système et de degré d'oscillation du système. Mais le contrôleur PID est largement applicable puisqu'il repose uniquement sur la réponse de la variable de processus mesurée, et non sur la connaissance ou un modèle du processus sous-jacent.

1.2.1 Control loop example

Consider a robotic arm that can be moved and positioned by a control loop. An electric motor may lift or lower the arm, depending on forward or reverse power applied, but power cannot be a simple function of position because of the inertial mass of the arm, forces due to gravity, external forces on the arm such as a load to lift or work to be done on an external object.

- The sensed position is the process variable (PV).
- The desired position is called the setpoint (SP).
- The difference between the PV and SP is the error (e), which quantifies whether the arm is too low or too high and by how much.
- The input to the process (the electric current in the motor) is the output from the PID controller. It is called either the manipulated variable (MV) or the control variable (CV).

By measuring the position (PV), and subtracting it from the setpoint (SP), the error (e) is found, and from it the controller calculates how much electric current to supply to the motor (MV).

Proportional

The obvious method is proportional control: **the motor current is set in proportion to the existing error**. However, this method fails if, for instance, the arm has to lift different weights: a greater weight needs a greater force applied for the same error on the down side, but a smaller force if the error is on the upside. That's where

Exemple de boucle de commande

Considérons un bras robotique qui peut être déplacé et positionné par une boucle de commande. Un moteur électrique peut soulever ou abaisser le bras, selon la puissance appliquée en avant ou en arrière, mais la puissance ne peut pas être une simple fonction de la position en raison de la masse inertielle du bras, des forces dues à la gravité, des forces externes sur le bras telles qu'une charge à soulever ou un travail à effectuer sur un objet externe.

- La position détectée est la variable de processus (PV).
- La position souhaitée est appelée le point de consigne (SP).
- La différence entre la PV et la SP est l'erreur (e), qui quantifie si le bras est trop bas ou trop haut et de combien.
- L'entrée du processus (le courant électrique dans le moteur) est la sortie du contrôleur PID. Elle est appelée soit la variable manipulée (MV), soit la variable de contrôle (CV).

En mesurant la position (PV), et en la soustrayant du point de consigne (SP), l'erreur (e) est trouvée, et à partir de celle-ci, le contrôleur calcule la quantité de courant électrique à fournir au moteur (MV).

Proportionnel

La méthode la plus évidente est la commande proportionnelle : le courant du moteur est réglé proportionnellement à l'erreur existante. Cependant, cette méthode échoue si, par exemple, le bras doit soulever des poids différents : un poids plus important nécessite l'application d'une force plus grande pour la même erreur du côté bas, mais une force plus petite si

the integral and derivative terms play their part.

Integral

An integral term increases action in relation not only to the error but also the time for which it has persisted. So, if the applied force is not enough to bring the error to zero, this force will be increased as time passes. A pure "I" controller could bring the error to zero, but it would be both slow reacting at the start (because the action would be small at the beginning, needing time to get significant) and brutal (the action increases as long as the error is positive, even if the error has started to approach zero).

Derivative

A derivative term does not consider the error (meaning it cannot bring it to zero: a pure D controller cannot bring the system to its setpoint), but **the rate of change of error, trying to bring this rate to zero.** It aims at flattening the error trajectory into a horizontal line, damping the force applied, and so reduces overshoot (error on the other side because of too great applied force). Applying too much integral when the error is small and decreasing will lead to overshoot. After overshooting, if the controller were to apply a large correction in the opposite direction and repeatedly overshoot the desired position, the output would oscillate around the setpoint in either a constant, growing, or decaying sinusoid. If the amplitude of the oscillations increases with time, the system is unstable. If they decrease, the system is stable. If the oscillations remain at a constant magnitude, the system is marginally stable.

l'erreur est du côté haut. C'est là que les termes intégral et dérivé jouent leur rôle.

Intégrale

Un terme intégral augmente l'action en fonction non seulement de l'erreur mais aussi du temps pendant lequel elle a persisté. Ainsi, si la force appliquée n'est pas suffisante pour ramener l'erreur à zéro, cette force sera augmentée au fur et à mesure que le temps passe. Un contrôleur purement "I" pourrait ramener l'erreur à zéro, mais il serait à la fois lent à réagir au début (car l'action serait faible au début, et aurait besoin de temps pour devenir significative) et brutal (l'action augmente tant que l'erreur est positive, même si l'erreur a commencé à se rapprocher de zéro).

Dérivée

Un terme dérivé ne considère pas l'erreur (ce qui signifie qu'il ne peut pas la ramener à zéro : un régulateur D pur ne peut pas amener le système à son point de consigne), mais le taux de variation de l'erreur, en essayant de ramener ce taux à zéro. Il vise à aplanir la trajectoire de l'erreur en une ligne horizontale, en amortissant la force appliquée, et réduit ainsi le dépassement (erreur de l'autre côté à cause d'une force appliquée trop importante). L'application d'une intégrale trop importante lorsque l'erreur est faible et décroissante entraînera un dépassement. Après un dépassement, si le régulateur devait appliquer une correction importante dans la direction opposée et dépasser à plusieurs reprises la position souhaitée, la sortie oscillerait autour du point de consigne dans une sinusoïde constante, croissante ou décroissante. Si l'amplitude des oscillations augmente avec le temps, le système est instable. Si elles diminuent, le système est stable. Si les oscillations restent à une magnitude constante, le système est marginalement stable.

Control damping

In the interest of achieving a controlled arrival at the desired position (SP) in a timely and accurate way, the controlled system needs to be critically damped. A well-tuned position control system will also apply the necessary currents to the controlled motor so that the arm pushes and pulls as necessary to resist external forces trying to move it away from the required position. The setpoint itself may be generated by an external system, such as a PLC or other computer system, so that it continuously varies depending on the work that the robotic arm is expected to do. A well-tuned PID control system will enable the arm to meet these changing requirements to the

Amortissement de la commande

Afin d'obtenir une arrivée contrôlée à la position souhaitée (SP) de manière opportune et précise, le système contrôlé doit être amorti de manière critique. Un système de contrôle de position bien réglé appliquera également les courants nécessaires au moteur contrôlé afin que le bras pousse et tire comme il se doit pour résister aux forces externes qui tentent de l'éloigner de la position requise. Le point de consigne lui-même peut être généré par un système externe, tel qu'un automate programmable ou un autre système informatique, de sorte qu'il varie continuellement en fonction du travail que le bras robotique est censé effectuer. Un système de commande PID bien réglé permettra au bras de répondre à ces exigences changeantes au mieux de ses capacités.

best of its capabilities.

Response to disturbances

If a controller starts from a stable state with zero error ($PV = SP$), then further changes by the controller will be in response to changes in other measured or unmeasured inputs to the process that affect the process, and hence the PV. Variables that affect the process other than the MV are known as disturbances. Generally, controllers are used to reject disturbances and to implement setpoint changes. A change in load on the arm constitutes a disturbance to the robot arm control process.

Applications

In theory, a controller can be used to control any process that has a measurable output (PV), a known ideal value for that output (SP), and an input to the process (MV) that will affect the relevant PV. Controllers are used in industry to regulate temperature, pressure, force, feed rate, flow rate, chemical composition (component concentrations), weight, position, speed, and practically every other variable for which a measurement exists.

Réponse aux perturbations

Si un contrôleur démarre à partir d'un état stable avec une erreur nulle ($PV = SP$), les modifications ultérieures apportées par le contrôleur se feront en réponse à des changements dans d'autres entrées mesurées ou non mesurées du processus qui affectent le processus, et donc le PV. Les variables qui affectent le processus autres que la MV sont appelées perturbations. En général, les régulateurs sont utilisés pour rejeter les perturbations et pour mettre en œuvre les changements de point de consigne. Une modification de la charge sur le bras constitue une perturbation du processus de commande du bras du robot.

Applications

En théorie, un régulateur peut être utilisé pour contrôler tout processus ayant une sortie mesurable (PV), une valeur idéale connue pour cette sortie (SP) et une entrée dans le processus (MV) qui affectera la PV concernée. Les contrôleurs sont utilisés dans l'industrie pour réguler la température, la pression, la force, la vitesse d'alimentation, le débit, la composition chimique (concentrations des composants), le poids, la position, la vitesse et pratiquement toute autre variable pour laquelle il existe une mesure.

1.2.2 Cascade PID control

One distinctive advantage of PID controllers is that two PID controllers can be used together to yield better dynamic performance. This is called cascaded PID control. Two controllers are in cascade when they are arranged so that one regulates the set point of the other. A PID controller acts as outer loop controller, which controls the primary physical parameter, such as fluid level or velocity. The other controller acts as inner loop controller, which reads the output of outer loop controller as setpoint, usually controlling a more rapid changing parameter, flowrate or acceleration. It can be mathematically proven that the working frequency of the controller is increased and the time constant of the object is reduced by using cascaded PID controllers.

For example, a temperature-controlled circulating bath has two PID controllers in cascade, each with its own thermocouple temperature sensor. The outer controller controls the temperature of the water using a thermocouple located far from the heater, where it accurately reads the temperature of the bulk of the water. The error term of this PID

Contrôle PID en cascade

Un avantage distinctif des régulateurs PID est que deux régulateurs PID peuvent être utilisés ensemble pour obtenir de meilleures performances dynamiques. C'est ce qu'on appelle la régulation PID en cascade. Deux régulateurs sont en cascade lorsqu'ils sont disposés de manière à ce que l'un régule le point de consigne de l'autre. Un régulateur PID agit comme régulateur de boucle externe, qui contrôle le paramètre physique primaire, tel que le niveau ou la vitesse du fluide. L'autre contrôleur agit comme un contrôleur de boucle interne, qui lit la sortie du contrôleur de boucle externe comme point de consigne, contrôlant généralement un paramètre à changement plus rapide, le débit ou l'accélération. Il peut être prouvé mathématiquement que la fréquence de travail du contrôleur est augmentée et que la constante de temps de l'objet est réduite en utilisant des contrôleurs PID en cascade.

Par exemple, un bain de circulation à température contrôlée comporte deux régulateurs PID en cascade, chacun ayant son propre capteur de température à thermocouple. Le régulateur extérieur contrôle la température de l'eau à l'aide d'un thermocouple situé loin de l'élément chauffant, où il lit avec précision la

controller is the difference between the desired bath temperature and measured temperature. Instead of controlling the heater directly, the outer PID controller sets a heater temperature goal for the inner PID controller. The inner PID controller controls the temperature of the heater using a thermocouple attached to the heater. The inner controller's error term is the difference between this heater temperature setpoint and the measured temperature of the heater. Its output controls the actual heater to stay near this setpoint.

The proportional, integral, and differential terms of the two controllers will be very different. The outer PID controller has a long time constant – all the water in the tank needs to heat up or cool down. The inner loop responds much more quickly. Each controller can be tuned to match the physics of the system it controls – heat transfer and thermal mass of the whole tank or of just the heater – giving better total response.

température de la majeure partie de l'eau. Le terme d'erreur de ce contrôleur PID est la différence entre la température désirée du bain et la température mesurée. Au lieu de contrôler directement le réchauffeur, le contrôleur PID externe fixe un objectif de température du réchauffeur pour le contrôleur PID interne. Le contrôleur PID interne contrôle la température de l'élément chauffant à l'aide d'un thermocouple fixé à l'élément chauffant. Le terme d'erreur du contrôleur interne est la différence entre ce point de consigne de température du chauffage et la température mesurée du chauffage. Sa sortie commande le chauffage réel pour qu'il reste proche de ce point de consigne.

Les termes proportionnel, intégral et différentiel des deux régulateurs sont très différents. Le régulateur PID extérieur a une longue constante de temps - toute l'eau du réservoir a besoin de se réchauffer ou de se refroidir. La boucle intérieure réagit beaucoup plus rapidement. Chaque régulateur peut être réglé pour correspondre à la physique du système qu'il contrôle - transfert de chaleur et masse thermique de l'ensemble du réservoir ou seulement du réchauffeur - ce qui donne une meilleure réponse totale.



1.3 Controlled Variables

For a particular industrial process there may be more than one controlled variable and each of the controlled variables can have its own closed loop control system.

The controlled variable may be:

- Position (angular or linear)
- Temperature
- Pressure
- Flow rate
- Humidity
- Speed (angular or linear)
- Acceleration
- Light level
- Sound level

The control system may operate using pneumatic, hydraulic or electrical principles and *the sensors used for the measurement of the controlled variable must provide an output signal* in a form suitable for the system in use. This will normally involve a conversion from one energy system to another, devices used to accomplish this energy conversion are referred to as **TRANSDUCERS**.

Sensors and actuators are both forms of transducer, sensors representing input transducers and actuators representing output transducers.

Variables contrôlées

Pour un processus industriel particulier, il peut y avoir plus d'une variable contrôlée et chacune des variables contrôlées peut avoir son propre système de contrôle en boucle fermée.

La variable contrôlée peut être :

- la position (angulaire ou linéaire)
- la température
- la pression
- Débit
- l'humidité
- Vitesse (angulaire ou linéaire)
- Accélération
- Niveau de lumière
- Niveau sonore

Le système de contrôle peut fonctionner selon des principes pneumatiques, hydrauliques ou électriques et les capteurs utilisés pour mesurer la variable contrôlée doivent fournir un signal de sortie sous une forme adaptée au système utilisé.

Cela implique normalement une conversion d'un système d'énergie à un autre, les dispositifs utilisés pour accomplir cette conversion d'énergie sont appelés **TRANSDUCTEURS**. Les capteurs et les actionneurs sont tous deux des formes de transducteurs, les capteurs représentant des transducteurs d'entrée et les actionneurs des transducteurs de sortie.

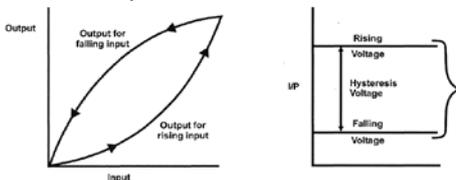


1.4 Glossary of Terms	Glossaire des termes
<p style="text-align: center;">Transducers</p> <p>Transducer: A device which converts information from one energy system to another.</p> <p>Sensor: A device which senses, or measures, the magnitude of system variables. Normally they also convert the measured quantity into another energy system and hence they are also transducers.</p> <p>Actuator: A device which accepts an input in one system and converts it into another energy system, which is normally mechanical. These devices are also transducers.</p> <p>Specification: Data specifying the performance capabilities and requirements of equipment.</p> <p>Accuracy: The error present in a measurement as compared to the true value of the quantity.</p> <p>Sensitivity: The ratio of the output of a device compared to the magnitude of the input quantity.</p> <p>Resolution: The largest change in the input that produces no detectable change in the output; for example, the degree to which a system can distinguish between adjacent values or settings.</p> <p>Range: A statement of the values over which the device can be used and within which the accuracy is within the stated specification.</p> <p>Bandwidth: The range of input signal frequencies over which a device or circuit is capable of being operated while providing an output within its stated specification.</p> <p>Linear: A relationship between two quantities that have a constant ratio; for example, a graphical straight line relationship.</p> <p>Non linear: A relationship between two quantities that cannot be described by a linear relationship.</p> <p>Linearity: A measure of the deviation of a measurement from an ideal straight line response of the same measurement over the same range.</p> <p>Response time: The time taken for the output to reach, or be within a rated percentage of, a new final value, after the input has been changed.</p>	<p style="text-align: center;">Transducteurs</p> <p>Transducteur : Un dispositif qui convertit les informations d'un système énergétique à un autre.</p> <p>Capteur : Un dispositif qui détecte, ou mesure, la magnitude des variables du système. Normalement, ils convertissent également la quantité mesurée dans un autre système énergétique et sont donc également des transducteurs.</p> <p>Actionneur : Un dispositif qui accepte une entrée dans un système et la convertit en un autre système énergétique, qui est normalement mécanique. Ces dispositifs sont également des transducteurs.</p> <p>Spécification : Données spécifiant les capacités et les exigences de performance d'un équipement.</p> <p>Précision : L'erreur présente dans une mesure par rapport à la valeur réelle de la quantité.</p> <p>Sensibilité : Le rapport entre la sortie d'un dispositif et la grandeur de la quantité d'entrée.</p> <p>Résolution : Le plus grand changement dans l'entrée qui ne produit aucun changement détectable dans la sortie ; par exemple, le degré auquel un système peut distinguer entre des valeurs ou des paramètres adjacents.</p> <p>Gamme : Une déclaration des valeurs sur lesquelles le dispositif peut être utilisé et dans lesquelles la précision est conforme à la spécification indiquée.</p> <p>Bande passante : La gamme de fréquences du signal d'entrée sur laquelle un dispositif ou un circuit peut être utilisé tout en fournissant une sortie dans les limites de sa spécification.</p> <p>Linéaire : Une relation entre deux quantités qui ont un rapport constant ; par exemple, une relation graphique en ligne droite.</p> <p>Non linéaire : Une relation entre deux quantités qui ne peut être décrite par une relation linéaire.</p> <p>Linéarité : Mesure de l'écart d'une mesure par rapport à une réponse idéale en ligne droite de la même mesure sur la même plage.</p> <p>Temps de réponse : Le temps nécessaire pour que la sortie atteigne, ou se situe dans un pourcentage nominal, d'une nouvelle valeur finale, après que l'entrée ait été modifiée.</p>

Signal Conditioning Circuits	Circuits de conditionnement du signal
<p>Amplifier: A circuit having an input and output that are related linearly and with the output greater than the input. The circuit may operate on both DC and AC circuits.</p> <p>Offset: For a DC amplifier, with the input zero, the output may not be zero. This is referred to as the offset. With these amplifiers, a control is provided and labeled: "Offset" or "Set Zero" to set the output to zero with the input zero, before the amplifier is used.</p> <p>Gain: The ratio of output to input for a circuit.</p> <p>Attenuator: A circuit having an input and an output that are related linearly and having an output less than the input.</p> <p>AC Amplifier: An amplifier that will amplify alternating signals only.</p> <p>Differential Amplifier: A voltage amplifier having two inputs and where the output voltage magnitude is proportional to the difference in voltages between the two inputs.</p> <p>Summing Amplifier: A voltage amplifier having multiple inputs, the output being proportional to the sum of the various applied inputs.</p> <p>Inverter: A voltage amplifier having the polarity of the output the reverse of the input. The output magnitude may be the same as the input (gain of -1), or there may be voltage gain associated with the polarity reversal.</p> <p>Power Amplifier: An amplifier with a large current output capability.</p> <p>Buffer Amplifier: An amplifier having unity gain (output = input), and having a high input impedance and a low output impedance.</p> <p>Comparator: A circuit having two inputs A & B and an output that can be in one of two possible states depending on the magnitudes of the inputs. With input A greater than B, the output will be in one state (possibly high voltage). With input A less than B, the output will be in the alternative state (low voltage).</p> <p>Oscillator: A circuit producing an alternating output at a particular frequency.</p> <p>Alarm Oscillator: A circuit having an input and an output. With the input magnitude below a certain level, the output is zero. When the input exceeds the threshold the output is an alternating voltage.</p>	<p>Amplificateur : Circuit dont l'entrée et la sortie sont liées linéairement et dont la sortie est supérieure à l'entrée. Le circuit peut fonctionner à la fois en courant continu et en courant alternatif.</p> <p>Décalage : Pour un amplificateur à courant continu, avec une entrée nulle, la sortie peut ne pas être nulle. C'est ce qu'on appelle l'offset. Avec ces amplificateurs, une commande est fournie et étiquetée : "Offset" ou "Set Zero" pour régler la sortie à zéro avec l'entrée zéro, avant d'utiliser l'amplificateur.</p> <p>Gain : Le rapport entre la sortie et l'entrée d'un circuit.</p> <p>Atténuateur : Un circuit ayant une entrée et une sortie qui sont liées linéairement et ayant une sortie inférieure à l'entrée.</p> <p>Amplificateur de courant alternatif : Un amplificateur qui amplifie uniquement les signaux alternatifs.</p> <p>Amplificateur différentiel : Un amplificateur de tension ayant deux entrées et où l'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la différence de tension entre les deux entrées.</p> <p>Amplificateur sommateur : Un amplificateur de tension ayant plusieurs entrées, la sortie étant proportionnelle à la somme des différentes entrées appliquées.</p> <p>Inverseur : amplificateur de tension dont la polarité de la sortie est l'inverse de celle de l'entrée. L'amplitude de la sortie peut être la même que celle de l'entrée (gain de -1), ou il peut y avoir un gain de tension associé à l'inversion de polarité.</p> <p>Amplificateur de puissance : Un amplificateur avec une grande capacité de sortie de courant.</p> <p>Amplificateur tampon : Un amplificateur ayant un gain unitaire (sortie = entrée), et ayant une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible.</p> <p>Comparateur : Un circuit ayant deux entrées A et B et une sortie qui peut être dans l'un des deux états possibles en fonction de la magnitude des entrées. Avec une entrée A supérieure à B, la sortie sera dans un état (éventuellement haute tension). Avec une entrée A inférieure à B, la sortie sera dans l'autre état (basse tension).</p> <p>Oscillateur : Un circuit produisant une sortie alternative à une fréquence particulière.</p> <p>Oscillateur d'alarme : Un circuit ayant une entrée et une sortie. Lorsque l'amplitude de l'entrée est inférieure à un certain niveau, la sortie est nulle. Lorsque l'entrée dépasse le seuil, la sortie est une tension alternative.</p>

Hysteresis:

The transfer characteristic of a non-linear device for increasing input voltages may be different from the characteristic for decreasing input voltages. The result is a 'hysteresis loop,' as shown in figure below. For a switching circuit, the term 'hysteresis' normally refers to the input switching voltages. The input voltage to cause switching for rising input voltages is arranged to be higher than that to produce switching for falling input voltages (see figure below). The difference between the input voltages is referred to as the hysteresis.



Latch: A circuit having two possible output states depending on the magnitude of the input voltage. When operated with the input level sufficient to change the output to its alternative state, the output is held (or latched) in this state irrespective of the subsequent magnitude of the input voltage.

Filter: Circuit designed to allow signals of a selected frequency range to pass through and stop all others.

Low Pass Filter: A circuit allowing low frequency signals to pass while blocking the passage of higher frequencies.

High Pass Filter: A circuit allowing high frequency signals to pass while blocking the passage of lower frequencies.

Band Pass Filter: A circuit allowing signals over a selected range of frequencies to pass while blocking the passage of signals at both lower and higher frequencies.

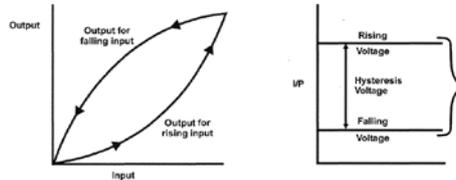
Full-Wave Rectifier: A circuit converting an alternating waveform into a unidirectional or DC waveform.

V/F Converter: A circuit converting a DC input voltage to an alternating voltage, the frequency being dependent on the magnitude of the DC input voltage.

F/V Converter: A circuit converting an alternating input voltage to a direct voltage output, the output voltage magnitude being proportional to the frequency of the input voltage.

Hystérésis :

La caractéristique de transfert d'un dispositif non linéaire pour des tensions d'entrée croissantes peut être différente de la caractéristique pour des tensions d'entrée décroissantes. Le résultat est une "boucle d'hystérésis", comme le montre la figure ci-dessous. Pour un circuit de commutation, le terme "hystérésis" fait normalement référence aux tensions de commutation d'entrée. La tension d'entrée qui provoque la commutation pour des tensions d'entrée croissantes est plus élevée que celle qui produit la commutation pour des tensions d'entrée décroissantes (voir figure ci-dessous). La différence entre les tensions d'entrée est appelée hystérésis.



Latch : Un circuit ayant deux états de sortie possibles en fonction de l'amplitude de la tension d'entrée. Lorsqu'il fonctionne avec un niveau d'entrée suffisant pour faire passer la sortie dans son autre état, la sortie est maintenue (ou verrouillée) dans cet état, quelle que soit l'amplitude ultérieure de la tension d'entrée.

Filtre : Circuit conçu pour laisser passer les signaux d'une gamme de fréquences sélectionnée et arrêter tous les autres.

Filtre passe-bas : Circuit permettant aux signaux de basse fréquence de passer tout en bloquant le passage des fréquences plus élevées.

Filtre passe-haut : Circuit permettant aux signaux de haute fréquence de passer tout en bloquant le passage des fréquences plus élevées.

Filtre passe-bande : Circuit permettant aux signaux d'une gamme de fréquences sélectionnée de passer tout en bloquant le passage des signaux à des fréquences plus basses et plus élevées.

Redresseur pleine onde : Circuit convertissant une forme d'onde alternative en une forme d'onde unidirectionnelle ou continue.

Convertisseur V/F : Circuit convertissant une tension d'entrée continue en une tension alternative, la fréquence dépendant de l'amplitude de la tension d'entrée continue.

Convertisseur F/V : Circuit convertissant une tension d'entrée alternative en une tension de sortie continue, l'amplitude de la tension de sortie étant proportionnelle à la fréquence de la tension d'entrée.

V/I Converter: A circuit converting an direct input voltage into an output current, the current magnitude depending on the input voltage.

I/V Converter: A circuit converting an input current into an output voltage, the voltage magnitude being dependent on the magnitude of the input current.

Integrator: A circuit having an output voltage that is proportional to the product (input voltage x time).

Differentiator: A circuit having an output voltage that is proportional to the rate-of-change of the input voltage.

Sample and Hold: A circuit with input and output. In the sample state, the output voltage is equal to and follows the input voltage. In the hold state, the output voltage is held at the value of the input signal at the instant the "hold" signal was initiated.

Ultrasonic: A signal at a frequency above the normal audio range and hence inaudible to the human ear (normally > 16kHz).

Convertisseur V/I : Circuit convertissant une tension d'entrée continue en un courant de sortie, l'amplitude du courant dépendant de la tension d'entrée.

Convertisseur I/V : Circuit convertissant un courant d'entrée en une tension de sortie, l'amplitude de la tension dépendant de l'amplitude du courant d'entrée.

Intégrateur : Circuit dont la tension de sortie est proportionnelle au produit (tension d'entrée x temps).

Différentiateur : Circuit dont la tension de sortie est proportionnelle au taux de variation de la tension d'entrée.

Echantillonnage et maintien : Circuit avec entrée et sortie. Dans l'état d'échantillonnage, la tension de sortie est égale à la tension d'entrée et la suit. Dans l'état de maintien, la tension de sortie est maintenue à la valeur du signal d'entrée à l'instant où le signal de maintien a été déclenché.

Ultrasons : Un signal à une fréquence supérieure à la gamme audio normale et donc inaudible pour l'oreille humaine (normalement > 16kHz).

-IT.96ATC-TC

CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE

- Régulateur de température à deux positions
- Régulateur de température à deux positions avec rétroaction retardée
- Régulateur de température à deux positions avec retour élastique
- Régulateur à trois plages
- Contrôles PI, PI et PID de température en utilisant la méthode CHR

-IT.96ATC-LC

CONTRÔLE DE NIVEAU

-IT.96ATC-FC

CONTRÔLE DU FLUX

- Caractéristiques de la pompe
- Caractéristiques du système de mesure
- Caractéristiques du processus niveau/débit
- Contrôle niveau/débit avec ajusteur P
- Contrôle niveau/débit avec régulateur PI
- Régulation niveau/débit avec régulateur PID
- Régulation niveau/débit avec un régulateur à 2 positions

-IT.96ATC-MT

CONTRÔLE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU

- Contrôles PI, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu en utilisant la méthode CHR.
- Contrôle d'un générateur de courant continu

-IT.96ATC-BS

SYSTÈME DE CONTRÔLÉ SIMULÉ

- Processus de premier ordre
- Processus de type I, contrôle du 2e ordre
- Processus supérieur au 1er ordre
- Contrôleur P
- Contrôleur I
- Contrôleur D
- Régulateur PID
- Contrôle, processus de type P
- Commande P, processus de 1er ordre et d'ordre supérieur
- Méthode dynamique Ziegler-Nichols
- Méthode statique de Chien-Hrones-Reswick
- Régulateur de position -2, processus de 1er ordre
- Régulateur de position -2, rétroaction retardée, processus de 2ème ordre

italtec Technical Training Systems S.R.L.

20129 – MILANO – ITALIA – Viale Regina Giovanna, 35

Tel. +39 02 90 721 606 – Fax. +39 02 90 720 227

e-mail: italtec@italtec.it www.italtec.it