

Automatic control technology is a wide generic term covering the operation and regulation of processes without continuous direct human intervention. This laboratory has been designed to introduce the fundamentals.

The end user has the possibility to perform the control of variables such as temperature, light, level, flow and DC motor in different ways as PID, open loop, closed-loop, continuous and discontinuous. Its architecture is very easy and modular allowing the user to both learn the concepts in a simple way and to create new ones.

Beside this trainer we have realized a compact board that allows to study the processes and the controllers, all in one unit, complete with data acquisition and processing software for Windows.



A laboratory designed for the study of automated control application to allow the student a practical training, based on the performance of guided experiments. Industrial type components are educationally adapted by using a modular panel system to allow easy step by step assembling, from the simplest circuit to the most complex system. This trainer has a modular structure and it consists of didactic panels installed on a vertical frame. It is supplied with a theoretical and practical manual.

The modularity of this didactic system can give the students a direct and immediate approach to the topics, offering the opportunity to study various subjects, performing several experiments.

-IT.96ATC-TC

TEMPERATURE CONTROL

- Two position controller in the temperature process
- Two position controller with delayed feedback in the temperature process
- Two position controller with elastic feedback in the temperature process
- Three range controller in the temperature process
- P, PI and PID controls of the temperature process using the CHR method

-IT.96ATC-LC

LEVEL CONTROL

-IT.96ATC-FC

FLOW CONTROL

- Pump's features
- Measurement system's features
- Level/Flow process features
- Level/Flow control with adjuster P
- Level/Flow control with adjuster PI
- Level/Flow control with adjuster PID
- Level/Flow control with a 2 position controller

-IT.96ATC-MT

CONTROL OF A DC MOTOR

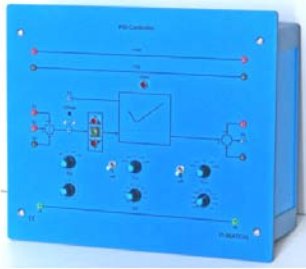
- P, PI and PID controls of the speed of a DC motor using the CHR method
- Control of a DC generator

-IT.96ATC-BS

SIMULATED CONTROLLED SYSTEM

- 1st order process
- 2nd order I control, I-type processes
- Higher than 1st order process
- P controller
- I controller
- D controller
- PI controller
- PD controller
- PID controller
- P control, P-type process
- P control, 1st and higher order processes
- Ziegler-Nichols dynamic method
- Chien-Hrones-Reswick static method
- 2 position controller, 1st order process
- 2 position controller, delayed feedback, 2nd order process
- 2 position controller, elastic feedback, 2nd order process





IT.96ATC-22 - PID CONTROLLER

This module can simulate a standard industrial controller for use as P, PI, PD or PID regulator in automatic closed-loop control systems.

Controller continuously adjustable parameters:

- **proportional gain $K_p = 0 \dots 1000$**
- **integral action time $T_I = 1 \text{ ms} \dots 100 \text{ s}$**
- **differential action time $T_D = 0.2 \text{ ms} \dots 20 \text{ s}$**



IT.96USB Data acquisition / control unit

Interface unit: used to interconnect real world signals to a data acquisition system.

- Power supply from USB, < 100mA
- 2 relay outputs
- 2 analogue outputs, serial 8 bit D/A converter
 - Function generator
- Output: -10/+10 V
- 8 analogue inputs, 12 bit A/D converter
 - 4 channel oscilloscope on input 1÷4
- Input: -10/+10 V
- Max speed of conversion: 10 kHz

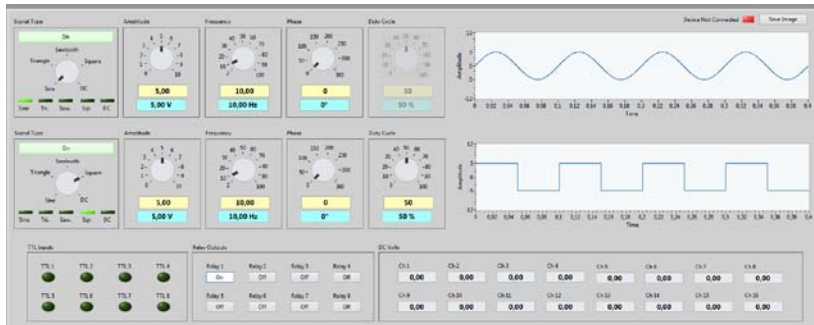


IT.96MSW Software

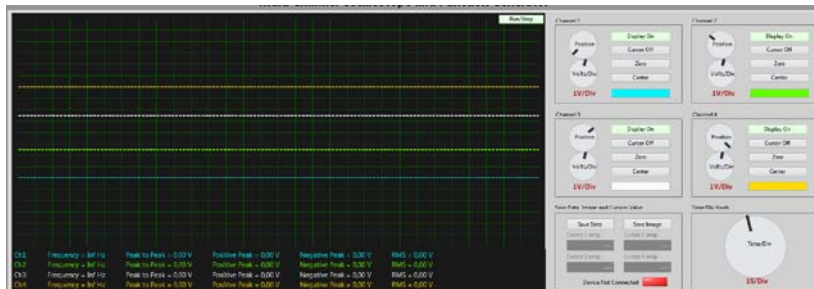
To generate the control signals and to acquire and visualize the signals and the wave forms to be analyzed.

- Input/Output Control window.
- Signal Generator window (continuous, square wave, ramp, triangular, sinusoidal, pulse).
- 3 trace Oscilloscope window with continuous, single and trigger control operation.
- 4 channel Chart Recorder window.
- Window with I/O controls for setting and visualizing the signals.

FUNCTION GENERATOR



OSCILLOSCOPE 4 Ch.



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.

Fondamenti di teoria del controllo automatico

Prima di affrontare lo sviluppo sperimentale relativo ai Processi, ai Controllori, alla tecnica di Regolazione Automatica Continua e Discontinua, fino all'analisi di specifici Controlli di Processo, è utile fornire una sintesi dei concetti di base relativi alla "Teoria e Tecnologia del Controllo Automatico", necessari per una corretta comprensione di quanto sviluppato con i sistemi didattici:

Level control,

Flow control,

Temperature control,

Dc Motor & Generator control

Simulated controlled system.

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*

-La Teoria del controllo

si occupa del controllo dei sistemi dinamici nei processi ingegneristici e nelle macchine. L'obiettivo è: **sviluppare un modello o un algoritmo che governa l'applicazione degli input del sistema per guidare il sistema verso uno stato desiderato**, minimizzando qualsiasi ritardo, sovraccarico, o errore di stato stazionario e assicurando un livello di stabilità del controllo; spesso con l'obiettivo di raggiungere uno stato ottimale.

Per fare questo, è necessario un controllore con il comportamento correttivo richiesto. Questo controllore monitora la variabile di processo controllata (PV), e la confronta con il riferimento o set point (SP). La differenza tra il valore effettivo e quello desiderato della variabile di processo, chiamata segnale di errore, o errore SP-PV, viene applicata come feedback per generare un'azione di controllo per portare la variabile di processo controllata allo stesso valore del **riferimento**. Altri aspetti che vengono studiati sono la controllabilità e l'osservabilità. Questa è la base del tipo avanzato di automazione che ha rivoluzionato la produzione, l'aeronautica, le comunicazioni e altre industrie. Si tratta del *"controllo in retroazione"*, che implica l'effettuazione di misurazioni tramite un sensore e

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.

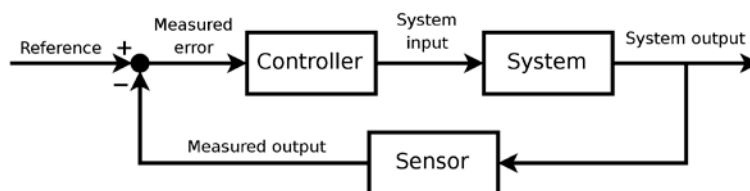
Although a major application of mathematical control theory is in control systems engineering, which deals with the design of process control systems for industry, other applications range far beyond this. As the general theory of feedback systems, control theory is useful wherever feedback occurs -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

l'esecuzione di regolazioni calcolate per mantenere la variabile misurata entro un intervallo prestabilito per mezzo di un "elemento di controllo finale", o "attuatore" o "trasduttore di uscita" come una valvola di controllo.

Di solito si fa un uso estensivo di uno stile diagrammatico noto come diagramma a blocchi. In esso la *funzione di trasferimento*, conosciuta anche come funzione di sistema, è un modello matematico della relazione tra ingresso e uscita basato sulle equazioni differenziali che descrivono il sistema.

La teoria del controllo risale al XIX secolo, quando la base teorica del funzionamento dei regolatori fu descritta per la prima volta da James Clerk Maxwell. La teoria del controllo è stata ulteriormente avanzata da Edward Routh nel 1874, Charles Sturm e nel 1895, Adolf Hurwitz, che hanno tutti contribuito a stabilire i criteri di stabilità del controllo; e dal 1922 in poi, lo sviluppo della teoria del controllo PID da parte di Nicolas Minorsky.

Sebbene una delle principali applicazioni della teoria matematica del controllo sia l'ingegneria dei sistemi di controllo, che si occupa della progettazione di sistemi di controllo di processo per l'industria, altre applicazioni vanno ben oltre. Come teoria generale dei sistemi di retroazione, la teoria del controllo è utile ovunque si verifichi la retroazione - così la teoria del controllo ha anche applicazioni nelle scienze della vita, nell'ingegneria informatica, nella sociologia e nella ricerca operativa.



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

Controllo ad anello aperto e ad anello chiuso (feedback)

Vi sono due tipi di anelli di controllo: controllo ad anello aperto e controllo ad anello chiuso (feedback). Nel controllo ad anello aperto, l'azione di controllo del controllore è indipendente dall'"uscita di processo" (o "variabile di processo controllata" - PV). Un buon esempio di questo è una caldaia di riscaldamento centrale controllata solo da un timer, in modo che il calore sia applicato per un tempo costante, indipendentemente dalla temperatura dell'edificio. L'azione di controllo è l'accensione/spegnimento temporizzato della caldaia, la variabile di processo è la temperatura dell'edificio, ma nessuno dei due è collegato.

Nel controllo ad anello chiuso, l'azione di controllo del

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.

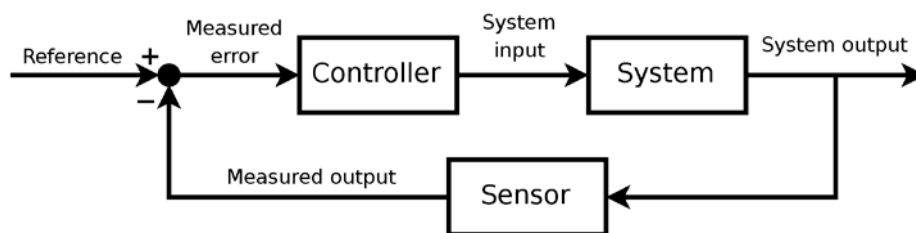
The definition of a closed loop control system according to the British Standard Institution is "a control system possessing monitoring feedback, the deviation signal formed as a result of this feedback being used to control the action of a final control element in such a way as to tend to reduce the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

Likewise; "A Feedback Control System is a system which tends to maintain a prescribed relationship of one system variable to another by comparing functions of these variables and using the difference as a means of control."

controllatore dipende dal feedback del processo sotto forma di valore della variabile di processo (PV). Nel caso dell'analogia della caldaia, un anello chiuso includerebbe un termostato per confrontare la temperatura dell'edificio (PV) con la temperatura impostata sul termostato (il set point - SP). Questo genera un'uscita del controllore per mantenere l'edificio alla temperatura desiderata accendendo e spegnendo la caldaia. Un regolatore ad anello chiuso, quindi, ha un anello di retroazione che assicura che il regolatore eserciti un'azione di controllo per manipolare la variabile di processo affinché sia uguale all'"ingresso di riferimento" o "set point". Per questo motivo, i controllori ad anello chiuso sono anche chiamati controllori di feedback.

La definizione di un sistema di controllo ad anello chiuso secondo la British Standard Institution è "un sistema di controllo che possiede un feedback di monitoraggio, il segnale di deviazione formato come risultato di questo feedback viene utilizzato per controllare l'azione di un elemento di controllo finale in modo tale da tendere a ridurre la deviazione a zero".

Allo stesso modo; "Un sistema di controllo a retroazione è un sistema che tende a mantenere una relazione prescritta di una variabile del sistema con un'altra comparando le funzioni di queste variabili e usando la differenza come mezzo di controllo."



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.

Uno schema a blocchi di un sistema di controllo a feedback negativo che utilizza un anello di feedback per controllare la variabile di processo confrontandola con un valore desiderato e applicando la differenza come segnale di errore per generare un'uscita di controllo per ridurre o eliminare l'errore.

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.

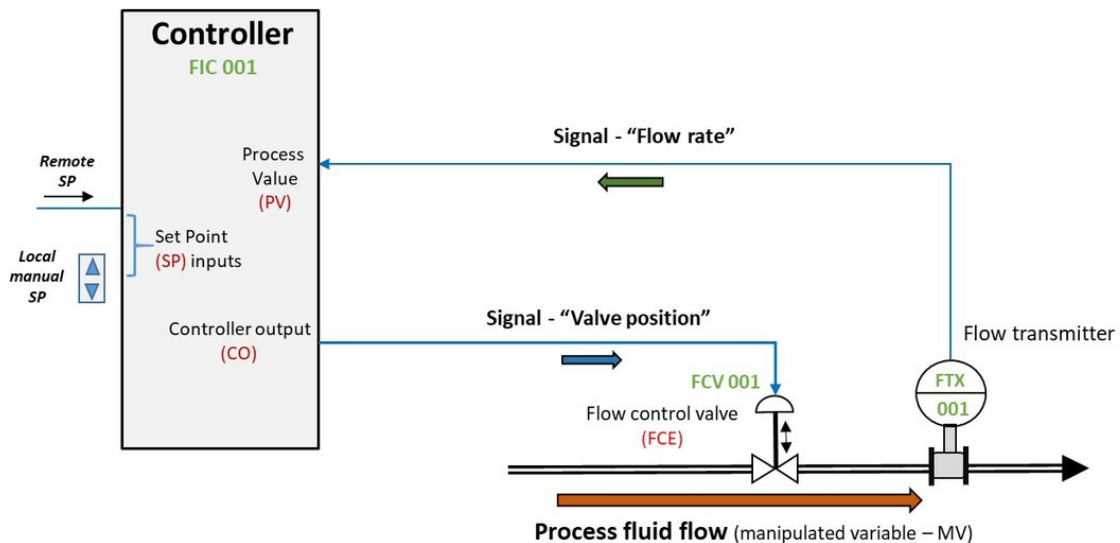
In a closed-loop control system, data from a sensor monitoring the car's speed (the system output) enters a controller which continuously compares the quantity representing the speed with the reference quantity representing the desired speed. The difference, called the error, determines the throttle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

Un esempio di un sistema di controllo è il cruise control di un'automobile, che è un dispositivo progettato per mantenere la velocità del veicolo a una velocità costante desiderata o di riferimento fornita dal conducente. Il controllore è il cruise control, l'impianto è l'auto, e il sistema è *l'auto e il cruise control*. L'uscita del sistema è la velocità dell'auto, e il controllo stesso è la posizione dell'acceleratore del motore che determina quanta potenza il motore eroga.

Un modo primitivo di implementare il controllo di crociera è semplicemente quello di bloccare la posizione dell'acceleratore quando il conducente inserisce il controllo di crociera. Tuttavia, se il cruise control è inserito su un tratto di strada non pianeggiante, allora l'auto viaggerà più lentamente in salita e più velocemente in discesa. Questo tipo di controllore è chiamato un controllore ad anello aperto perché non c'è feedback; nessuna misura dell'uscita del sistema (la velocità dell'auto) è usata per alterare il controllo (la posizione dell'acceleratore).

In un sistema di controllo ad anello chiuso, i dati di un sensore che controlla la velocità dell'auto (l'uscita del sistema) entrano in un controllore che confronta continuamente la quantità che rappresenta la velocità con la quantità di riferimento che rappresenta la velocità desiderata. La differenza, chiamata errore, determina la posizione dell'acceleratore (il controllo). Il risultato è quello di far corrispondere la velocità dell'auto alla velocità di riferimento (mantenere l'uscita del sistema desiderata). Ora, quando l'auto va in salita, la differenza tra l'input (la velocità rilevata) e il riferimento determina continuamente la posizione dell'acceleratore. Quando la velocità rilevata scende sotto il riferimento, la differenza aumenta, l'acceleratore si apre e la potenza del motore aumenta, accelerando il veicolo. In questo modo, il controllore contrasta dinamicamente i cambiamenti di velocità dell'auto. L'idea centrale di questi sistemi di controllo è il ciclo di feedback, il controllore influenza l'uscita del sistema, che a sua volta viene misurata e riportata al controllore.

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 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

Per superare le limitazioni del controllore ad anello aperto, la teoria del controllo introduce il feedback. Un controllore ad anello chiuso usa il feedback per controllare gli stati o le uscite di un sistema dinamico. Il suo nome deriva dal percorso dell'informazione nel sistema: gli input del processo (per esempio, la tensione applicata a un motore elettrico) hanno un effetto sugli output del processo (per esempio, la velocità o la coppia del motore), che viene misurato con sensori ed elaborato dal controllore; il risultato (il segnale di controllo) viene "restituito" come input al processo, chiudendo il ciclo.

I controllori ad anello chiuso hanno i seguenti vantaggi rispetto ai controllori ad anello aperto:

- reiezione dei disturbi (come le colline nell'esempio del controllo di crociera di cui sopra)
 - prestazioni garantite anche con incertezze del modello, quando la struttura del modello non corrisponde perfettamente al processo reale e i parametri del modello non sono esatti
 - i processi instabili possono essere stabilizzati
 - sensibilità ridotta alle variazioni dei parametri
 - migliori prestazioni di inseguimento del riferimento
- In alcuni sistemi, il controllo ad anello chiuso e quello ad anello aperto sono usati simultaneamente. In tali

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.

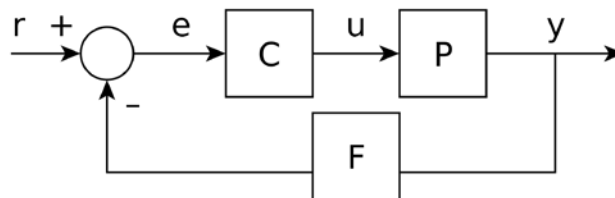
This is called a single-input-single-output (SISO) control system; MIMO (i.e., Multi-Input-Multi-Output) systems, with more than one input/output, are common. In such cases variables are represented through vectors instead of simple scalar values. For some distributed parameter systems the vectors may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

sistemi, il controllo ad anello aperto è definito feedforward e serve a migliorare ulteriormente le prestazioni di inseguimento del riferimento.

Un'architettura comune di controllo ad anello chiuso è il controllore PID.

L'uscita del sistema $y(t)$ viene riportata attraverso una misura del sensore F ad un confronto con il valore di riferimento $r(t)$. Il controllore C prende poi l'errore e (differenza) tra il riferimento e l'uscita per cambiare gli ingressi u al sistema sotto controllo P . Questo è mostrato nella figura. Questo tipo di controllore è un controllore ad anello chiuso o controllore di feedback.

Questo è chiamato un sistema di controllo single-input-single-output (SISO); i sistemi MIMO (cioè Multi-Input-Multi-Output), con più di un ingresso/uscita, sono comuni. In questi casi le variabili sono rappresentate attraverso vettori invece di semplici valori scalari. Per alcuni sistemi a parametri distribuiti i vettori possono essere infinitamente dimensionali (tipicamente funzioni).



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.

Se assumiamo che il controllore C , l'impianto P e il sensore F siano lineari e invarianti nel tempo (cioè, gli elementi della loro funzione di trasferimento $C(s)$, $P(s)$ e $F(s)$ non dipendono dal tempo), i sistemi di cui sopra possono essere analizzati usando la trasformata di Laplace sulle variabili.

1.1.3 PID feedback control overview

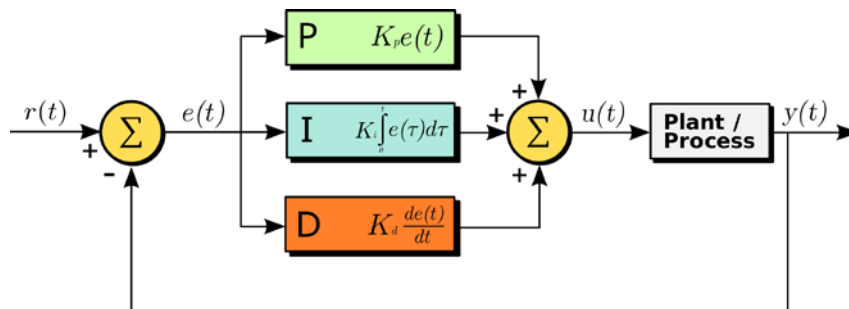
A proportional–integral–derivative controller (PID controller) is a control loop feedback mechanism control technique widely used in control systems. **A PID controller continuously calculates an error value $e(t)$ as the difference between a desired setpoint and a measured process variable and applies 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.**

Controllo di retroazione PID

Un controllore proporzionale-integrale-derivativo (controllore PID) è una tecnica di controllo del meccanismo di feedback ad anello ampiamente utilizzata nei sistemi di controllo. Un regolatore PID calcola continuamente un valore di errore $e(t)$ come la differenza tra un setpoint desiderato e una variabile di processo misurata e applica una correzione basata su termini proporzionali, integrali e derivati. PID è l'acronimo di Proporzionale-Integrale-Derivativa, **che si riferisce ai tre termini che operano sul segnale di errore per produrre un segnale di controllo.**

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

La comprensione teorica e l'applicazione risalgono agli anni '20, e sono implementati in quasi tutti i sistemi di controllo analogici; originariamente nei controllori meccanici, e poi usando l'elettronica discreta e più tardi nei computer di processo industriali. Il controllore PID è probabilmente il progetto di controllo in retroazione più usato. Nella figura seguente chiamiamo $u(t)$ è il segnale di controllo inviato al sistema, $y(t)$ è l'uscita misurata e $r(t)$ è l'uscita desiderata, ed $e(t) = r(t) - y(t)$ è l'errore di inseguimento



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.

Schema a blocchi di un regolatore PID in un anello di retroazione, $r(t)$ è il valore di processo desiderato o "set point", e $y(t)$ è il valore di processo misurato.

La dinamica desiderata dell'anello chiuso si ottiene regolando i tre parametri K_P , K_I e K_D , spesso iterativamente per "tuning" e senza la conoscenza specifica di un modello di impianto. La stabilità può spesso essere garantita utilizzando solo il termine proporzionale. Il termine integrale permette la reiezione di un disturbo a gradini (spesso una specifica sorprendente nel controllo di processo). Il termine derivato è usato per fornire lo *smorzamento o il modellamento* della risposta

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

Teoria del controllo lineare e non lineare

Teoria del controllo lineare - Si applica a sistemi fatti di dispositivi che obbediscono al principio di sovrapposizione, che significa che l'uscita è proporzionale all'ingresso. Sono governati da equazioni differenziali lineari. Una sottoclasse importante è costituita da sistemi che in aggiunta hanno parametri che non cambiano nel tempo, chiamati sistemi lineari invarianti nel tempo (LTI). Questi sistemi sono suscettibili di potenti tecniche matematiche nel dominio della frequenza di grande generalità, come la trasformata di Laplace, la trasformata di Fourier, la trasformata Z, il Bode plot, il root locus e il criterio di stabilità di Nyquist. Queste portano ad una descrizione del sistema usando termini come larghezza di banda, risposta in frequenza, autovalori, guadagno, frequenze risonanti, zeri e poli, che danno soluzioni per la risposta del sistema e tecniche di

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.

progettazione per la maggior parte dei sistemi di interesse.

Teoria del controllo non lineare - Questo copre una classe più ampia di sistemi che non obbediscono al principio di sovrapposizione, e si applica a più sistemi del mondo reale perché tutti i sistemi di controllo reali sono non lineari. Questi sistemi sono spesso governati da equazioni differenziali non lineari. Le poche tecniche matematiche che sono state sviluppate per gestirli sono più difficili e molto meno generali, spesso si applicano solo a categorie ristrette di sistemi. Queste includono la teoria dei cicli limite, le mappe di Poincaré, il teorema di stabilità di Lyapunov e le funzioni descrittive. I sistemi non lineari sono spesso analizzati usando metodi numerici su computer, per esempio simulando il loro funzionamento usando un linguaggio di simulazione. Se solo le soluzioni vicine a un punto stabile sono di interesse, i sistemi non lineari possono spesso essere linearizzati approssimandoli con un sistema lineare usando la teoria della perturbazione, e si possono usare tecniche lineari.

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 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

Tecniche di analisi - dominio della frequenza e dominio del tempo

Le tecniche matematiche per l'analisi e la progettazione di sistemi di controllo rientrano in due diverse categorie:

Dominio della frequenza - In questo tipo i valori delle variabili di stato, le variabili matematiche che rappresentano l'input, l'output e il feedback del sistema sono rappresentati come funzioni di frequenza. Il segnale d'ingresso e la funzione di trasferimento del sistema sono convertiti da funzioni temporali a funzioni di frequenza tramite una trasformazione come la trasformata di Fourier, la trasformata di Laplace o la trasformata Z. Il vantaggio di questa tecnica è che risulta in una semplificazione della matematica; le equazioni differenziali che rappresentano il sistema sono sostituite da equazioni algebriche nel dominio della frequenza che è molto più semplice da risolvere. Tuttavia, le tecniche del dominio della frequenza possono essere utilizzate solo con sistemi lineari, come menzionato sopra.

Rappresentazione dello spazio di stato nel dominio del tempo - In questo tipo i valori delle variabili di stato sono rappresentati come funzioni del tempo. Con questo modello, il sistema da analizzare è rappresentato da una o più equazioni differenziali. Poiché le tecniche del dominio della frequenza sono limitate ai sistemi lineari, il dominio del tempo è ampiamente utilizzato per analizzare i sistemi non lineari del mondo reale. Anche se questi sono più difficili da risolvere, le moderne tecniche di simulazione al computer come i linguaggi di

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.

simulazione hanno reso la loro analisi di routine.

In contrasto con l'analisi nel dominio della frequenza della teoria classica del controllo, la moderna teoria del controllo utilizza la rappresentazione dello spazio di stato nel dominio del tempo, un modello matematico di un sistema fisico come un insieme di variabili di ingresso, uscita e stato correlate da equazioni differenziali del primo ordine. Per astrarre dal numero di ingressi, uscite e stati, le variabili sono espresse come vettori e le equazioni differenziali e algebriche sono scritte in forma di matrice (quest'ultima è possibile solo quando il sistema dinamico è lineare). La rappresentazione dello spazio di stato (conosciuta anche come "approccio del dominio del tempo") fornisce un modo conveniente e compatto per modellare e analizzare sistemi con più ingressi e uscite. Con ingressi e uscite, dovremmo altrimenti scrivere le trasformate di Laplace per codificare tutte le informazioni su un sistema. A differenza dell'approccio del dominio della frequenza, l'uso della rappresentazione dello spazio di stato non è limitato ai sistemi con componenti lineari e condizioni iniziali nulle. "Spazio di stato" si riferisce allo spazio i cui assi sono le variabili di stato. Lo stato del sistema può essere rappresentato come un punto all'interno di questo spazio.

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.

Interfacciamento del sistema - SISO & MIMO

I sistemi di controllo possono essere divisi in diverse categorie a seconda del numero di ingressi e uscite. Single-input single-output (SISO) - Questo è il tipo più semplice e comune, in cui un'uscita è controllata da un segnale di controllo. Esempi sono l'esempio del cruise control di cui sopra, o un sistema audio, in cui l'ingresso di controllo è il segnale audio in ingresso e l'uscita sono le onde sonore dall'altoparlante.

Multiple-input multiple-output (MIMO) - Questi si trovano in sistemi più complicati. Per esempio, i moderni grandi telescopi come il Keck e l'MMT hanno specchi composti da molti segmenti separati, ciascuno controllato da un attuatore. La forma dell'intero specchio è costantemente regolata da un sistema di controllo dell'ottica attiva MIMO utilizzando l'input di più sensori sul piano focale, per compensare i cambiamenti nella forma dello specchio dovuti all'espansione termica, alla contrazione, alle sollecitazioni quando viene ruotato e alla distorsione del fronte d'onda dovuta alla turbolenza nell'atmosfera. Sistemi complicati come i reattori nucleari e le cellule umane sono simulati da un computer come grandi sistemi di controllo 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.

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 x axis is the real axis and the discrete Z-transform is in circular coordinates where the ρ 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.

Stabilità

La stabilità di un sistema dinamico generale senza input può essere descritta con i criteri di stabilità di Lyapunov.

Un sistema lineare è chiamato stabile bounded-input bounded-output (BIBO) (ingresso-vincolato) se la sua uscita rimane vincolata per qualsiasi input vincolato.

La stabilità per i sistemi non lineari che prendono un input è la stabilità input-to-state (ISS), che combina la stabilità di Lyapunov e una nozione simile alla stabilità BIBO.

Per semplicità, le seguenti descrizioni si concentrano sui sistemi lineari a tempo continuo e a tempo discreto.

Matematicamente, questo significa che perché un sistema lineare causale sia stabile tutti i poli della sua funzione di trasferimento devono avere valori reali negativi, cioè la parte reale di ogni polo deve essere minore di zero. In pratica, la stabilità richiede che i poli complessi della funzione di trasferimento risiedano nella metà sinistra aperta del piano complesso per il tempo continuo, quando si usa la trasformata di Laplace per ottenere la funzione di trasferimento all'interno del cerchio unitario per il tempo discreto, quando si usa la trasformata Z.

La differenza tra i due casi è semplicemente dovuta al metodo tradizionale di tracciare le funzioni di trasferimento a tempo continuo rispetto a quelle a tempo discreto. La trasformazione continua di Laplace è in coordinate cartesiane dove l'asse x è l'asse reale e la trasformazione Z discreta è in coordinate circolari dove l'asse ρ è l'asse reale.

Quando le condizioni appropriate di cui sopra sono soddisfatte, si dice che un sistema è asintoticamente stabile; le variabili di un sistema di controllo asintoticamente stabile diminuiscono sempre dal loro valore iniziale e non mostrano oscillazioni permanenti. Le oscillazioni permanenti si verificano quando un polo ha una parte reale esattamente uguale a zero (nel caso del tempo continuo) o un modulo uguale a uno (nel caso del tempo discreto). Se la risposta di un sistema semplicemente stabile non decade né cresce nel tempo, e non ha oscillazioni, è marginalmente stabile; in questo caso la funzione di trasferimento del sistema ha poli non ripetuti all'origine del piano complesso (cioè la loro componente reale e complessa è zero nel caso del tempo continuo). Le oscillazioni sono presenti quando i poli con parte reale uguale a zero hanno una parte immaginaria non uguale a zero.

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

PID controller

La caratteristica distintiva del regolatore PID è la capacità di usare i tre termini di controllo di influenza proporzionale, integrale e derivativa sull'uscita del regolatore per applicare un controllo accurato e ottimale. Il diagramma a blocchi mostra i principi di come questi termini sono generati e applicati.

Mostra un regolatore PID, che calcola continuamente un valore di errore $e(t)$ come la differenza tra un setpoint desiderato $SP=r(t)$ e una variabile di processo misurata

$$PV=y(t):e(t)=r(t)-y(t)$$

e applica una correzione basata su termini proporzionali, integrali e derivati. Il controllore cerca di minimizzare l'errore nel tempo regolando una variabile di controllo

$u(t)$, come l'apertura di una valvola di controllo, a un nuovo valore determinato da una somma ponderata dei termini di controllo.

In questo modello:

Il termine P è proporzionale al valore attuale dell'errore $SP - PV$ $e(t)$. Per esempio, se l'errore è grande e positivo, l'uscita di controllo sarà proporzionalmente grande e positiva, tenendo conto del fattore di guadagno "K". Usando il controllo proporzionale da solo, si avrà un errore tra il setpoint e il valore reale del processo, perché richiede un errore per generare la risposta proporzionale. Se non c'è errore, non c'è risposta correttiva.

Il termine I tiene conto dei valori passati dell'errore $SP - PV$ e li integra nel tempo per produrre il termine I. Per esempio, se c'è un errore residuo $SP - PV$ dopo l'applicazione del controllo proporzionale, il termine integrale cerca di eliminare l'errore residuo aggiungendo un effetto di controllo dovuto al valore cumulativo storico dell'errore. Quando l'errore è eliminato, il termine integrale cesserà di crescere. Questo farà sì che l'effetto proporzionale diminuisca al diminuire dell'errore, ma questo è compensato dall'effetto integrale crescente.

Il termine D è la migliore stima della tendenza futura dell'errore $SP - PV$, basata sul suo attuale tasso di variazione. È talvolta chiamato "controllo anticipatorio", poiché cerca effettivamente di ridurre l'effetto dell'errore $SP - PV$ esercitando un'influenza di controllo generata dal tasso di variazione dell'errore. Più rapido è il cambiamento, maggiore è l'effetto di controllo o di smorzamento.

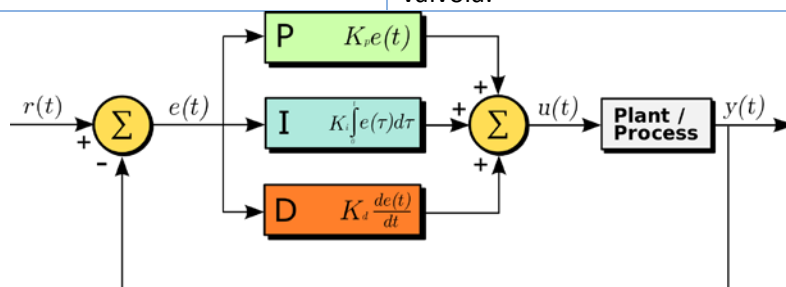
Sintonizzazione - L'equilibrio di questi effetti si ottiene con la sintonizzazione del loop per produrre la funzione di controllo ottimale. Le costanti di

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.

regolazione sono indicate di seguito come "K" e devono essere derivate per ogni applicazione di controllo, poiché dipendono dalle caratteristiche di risposta dell'intero anello esterno al controllore. Queste dipendono dal comportamento del sensore di misura, dall'elemento di controllo finale (come una valvola di controllo), da eventuali ritardi del segnale di controllo e dal processo stesso. I valori approssimativi delle costanti possono di solito essere inseriti inizialmente conoscendo il tipo di applicazione, ma sono normalmente raffinati, o sintonizzati, "urtando" il processo nella pratica introducendo un cambiamento di setpoint e osservando la risposta del sistema.

Azione di controllo - Il modello matematico e il loop pratico di cui sopra usano entrambi un'azione di controllo diretta per tutti i termini, il che significa che un errore positivo crescente risulta in una correzione positiva crescente dell'uscita di controllo. Il sistema è chiamato ad azione inversa se è necessario applicare un'azione correttiva negativa. Per esempio, se la valvola nell'anello di flusso era 100-0% di apertura della valvola per 0-100% di uscita di controllo - significa che l'azione di controllo deve essere invertita. Alcuni schemi di controllo di processo ed elementi di controllo finali richiedono questa azione inversa. Un esempio potrebbe essere una valvola per l'acqua di raffreddamento, dove la modalità fail-safe, in caso di perdita del segnale, sarebbe il 100% di apertura della valvola; quindi lo 0% di uscita del controller deve causare il 100% di apertura della valvola.



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.

Anche se un regolatore PID ha tre termini di controllo, alcune applicazioni hanno bisogno solo di uno o due termini per fornire un controllo appropriato. Questo si ottiene impostando i parametri non utilizzati a zero e viene chiamato un controllore PI, PD, P o I in assenza delle altre azioni di controllo. I controllori PI sono abbastanza comuni nelle applicazioni in cui l'azione derivativa sarebbe sensibile al rumore di misura, ma il termine integrale è spesso necessario affinché il sistema raggiunga il suo valore target.

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'uso dell'algoritmo PID non garantisce un controllo ottimale del sistema o la sua stabilità di controllo. Possono verificarsi situazioni in cui ci sono ritardi eccessivi: la misura del valore di processo è ritardata, o l'azione di controllo non si applica abbastanza rapidamente. In questi casi la compensazione lead-lag è necessaria per essere efficace. La risposta del controllore può essere descritta in termini di reattività a un errore, il grado in cui il sistema supera un setpoint e il grado di qualsiasi oscillazione del sistema. Ma il regolatore PID è ampiamente applicabile poiché si basa solo sulla risposta della variabile di processo misurata, non sulla conoscenza o un modello del processo sottostante.

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 the integral and derivative terms play their part.

Esempio di anello di controllo

Consideriamo un braccio robotico che può essere mosso e posizionato da un anello di controllo. Un motore elettrico può sollevare o abbassare il braccio, a seconda della potenza applicata in avanti o all'indietro, ma la potenza non può essere una semplice funzione della posizione a causa della massa inerziale del braccio, delle forze dovute alla gravità, delle forze esterne sul braccio come un carico da sollevare o un lavoro da fare su un oggetto esterno.

- La posizione rilevata è la variabile di processo (PV).
- La posizione desiderata è chiamata setpoint (SP).
- La differenza tra PV e SP è l'errore (e), che quantifica se il braccio è troppo basso o troppo alto e di quanto.
- L'ingresso al processo (la corrente elettrica nel motore) è l'uscita del controllore PID. Si chiama la variabile manipolata (MV) o la variabile di controllo (CV).

Misurando la posizione (PV), e sottraendola dal setpoint (SP), si trova l'errore (e), e da questo il controllore calcola quanta corrente elettrica fornire al motore (MV).

Proporzionale

Il metodo più ovvio è il controllo proporzionale: la corrente del motore è impostata in proporzione all'errore esistente. Tuttavia, questo metodo fallisce se, per esempio, il braccio deve sollevare pesi diversi: un peso maggiore ha bisogno di una forza maggiore applicata per lo stesso errore in basso, ma una forza minore se l'errore è in alto. È qui che i termini integrali e derivati fanno la loro parte.

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.

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 best of its capabilities.

Integrale

Un termine integrale aumenta l'azione in relazione non solo all'errore ma anche al tempo per il quale è persistito. Così, se la forza applicata non è sufficiente a portare l'errore a zero, questa forza sarà aumentata con il passare del tempo. Un controllore "I" puro potrebbe portare l'errore a zero, ma sarebbe sia lento a reagire all'inizio (perché l'azione sarebbe piccola all'inizio, avendo bisogno di tempo per diventare significativa) sia brutale (l'azione aumenta finché l'errore è positivo, anche se l'errore ha iniziato ad avvicinarsi a zero).

Derivata

Un termine derivativo non considera l'errore (cioè non può portarlo a zero: un regolatore D puro non può portare il sistema al suo setpoint), ma il tasso di variazione dell'errore, cercando di portare questo tasso a zero. Mira ad appiattire la traiettoria dell'errore in una linea orizzontale, smorzando la forza applicata, e riducendo così l'overshoot (errore dall'altra parte a causa di una forza applicata troppo grande). Applicare troppo integrale quando l'errore è piccolo e decrescente porterà all'overshooting. Dopo l'overshooting, se il controllore dovesse applicare una grande correzione nella direzione opposta e superare ripetutamente la posizione desiderata, l'uscita oscillerebbe intorno al setpoint in una sinusoida costante, crescente o decrescente. Se l'ampiezza delle oscillazioni aumenta con il tempo, il sistema è instabile. Se diminuiscono, il sistema è stabile. Se le oscillazioni rimangono a una grandezza costante, il sistema è marginalmente stabile.

Smorzamento di controllo

Nell'interesse di ottenere un arrivo controllato alla posizione desiderata (SP) in modo tempestivo e accurato, il sistema controllato deve essere smorzato in modo critico. Un sistema di controllo della posizione ben tarato applicherà anche le correnti necessarie al motore controllato in modo che il braccio spinga e tiri come necessario per resistere alle forze esterne che cercano di spostarlo dalla posizione richiesta. Il setpoint stesso può essere generato da un sistema esterno, come un PLC o un altro sistema informatico, in modo che vari continuamente a seconda del lavoro che il braccio robotico deve fare. Un sistema di controllo PID ben sintonizzato permetterà al braccio di soddisfare questi requisiti mutevoli al meglio delle sue capacità.

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.

Risposta ai disturbi

Se un controllore parte da uno stato stabile con errore zero ($PV = SP$), allora ulteriori cambiamenti da parte del controllore saranno in risposta a cambiamenti in altri input misurati o non misurati al processo che influenzano il processo, e quindi il PV. Le variabili che influenzano il processo oltre al MV sono note come disturbi. Generalmente, i controllori sono utilizzati per respingere i disturbi e per implementare le modifiche del setpoint. Un cambiamento del carico sul braccio costituisce un disturbo al processo di controllo del braccio del robot.

Applicazioni

In teoria, un controllore può essere usato per controllare qualsiasi processo che ha un'uscita misurabile (PV), un valore ideale noto per quell'uscita (SP), e un ingresso al processo (MV) che influenzerà la relativa PV. I controllori sono usati nell'industria per regolare la temperatura, la pressione, la forza, il tasso di alimentazione, la portata, la composizione chimica (concentrazioni di componenti), il peso, la posizione, la velocità, e praticamente ogni altra variabile per cui esiste una misura.

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

Controllo in cascata

Un vantaggio distintivo dei controllori PID è che due controllori PID possono essere utilizzati insieme per ottenere migliori prestazioni dinamiche. Questo è chiamato controllo PID in cascata. Due controllori sono in cascata quando sono disposti in modo che uno regoli il set point dell'altro. Un controllore PID agisce come controllore ad anello esterno, che controlla il parametro fisico primario, come il livello del fluido o la velocità. L'altro regolatore agisce come regolatore ad anello interno, che legge l'uscita del regolatore ad anello esterno come setpoint, di solito controllando un parametro che cambia più rapidamente, la portata o l'accelerazione. Si può dimostrare matematicamente che la frequenza di lavoro del regolatore viene aumentata e la costante di tempo dell'oggetto viene ridotta utilizzando i regolatori PID in cascata.

Per esempio, un bagno circolante a temperatura controllata ha due regolatori PID in cascata, ognuno con il suo sensore di temperatura a termocoppia. Il regolatore esterno controlla la temperatura dell'acqua usando una termocoppia situata lontano dal riscaldatore, dove legge accuratamente la temperatura della massa dell'acqua. Il termine di errore di questo

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.

regolatore PID è la differenza tra la temperatura desiderata del bagno e la temperatura misurata. Invece di controllare direttamente il riscaldatore, il regolatore PID esterno imposta un obiettivo di temperatura del riscaldatore per il regolatore PID interno. Il regolatore PID interno controlla la temperatura del riscaldatore usando una termocoppia collegata al riscaldatore. Il termine di errore del regolatore interno è la differenza tra questo setpoint di temperatura del riscaldatore e la temperatura misurata del riscaldatore. La sua uscita controlla il riscaldatore attuale per rimanere vicino a questo setpoint.

I termini proporzionali, integrali e differenziali dei due controllori saranno molto diversi. Il regolatore PID esterno ha una lunga costante di tempo - tutta l'acqua nel serbatoio deve riscaldarsi o raffreddarsi. L'anello interno risponde molto più rapidamente. Ogni regolatore può essere sintonizzato per adattarsi alla fisica del sistema che controlla - trasferimento di calore e massa termica dell'intero serbatoio o del solo riscaldatore - dando una migliore risposta 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.

Variabili controllate

Per un particolare processo industriale ci può essere più di una variabile controllata e ciascuna delle variabili controllate può avere il suo sistema di controllo ad anello chiuso.

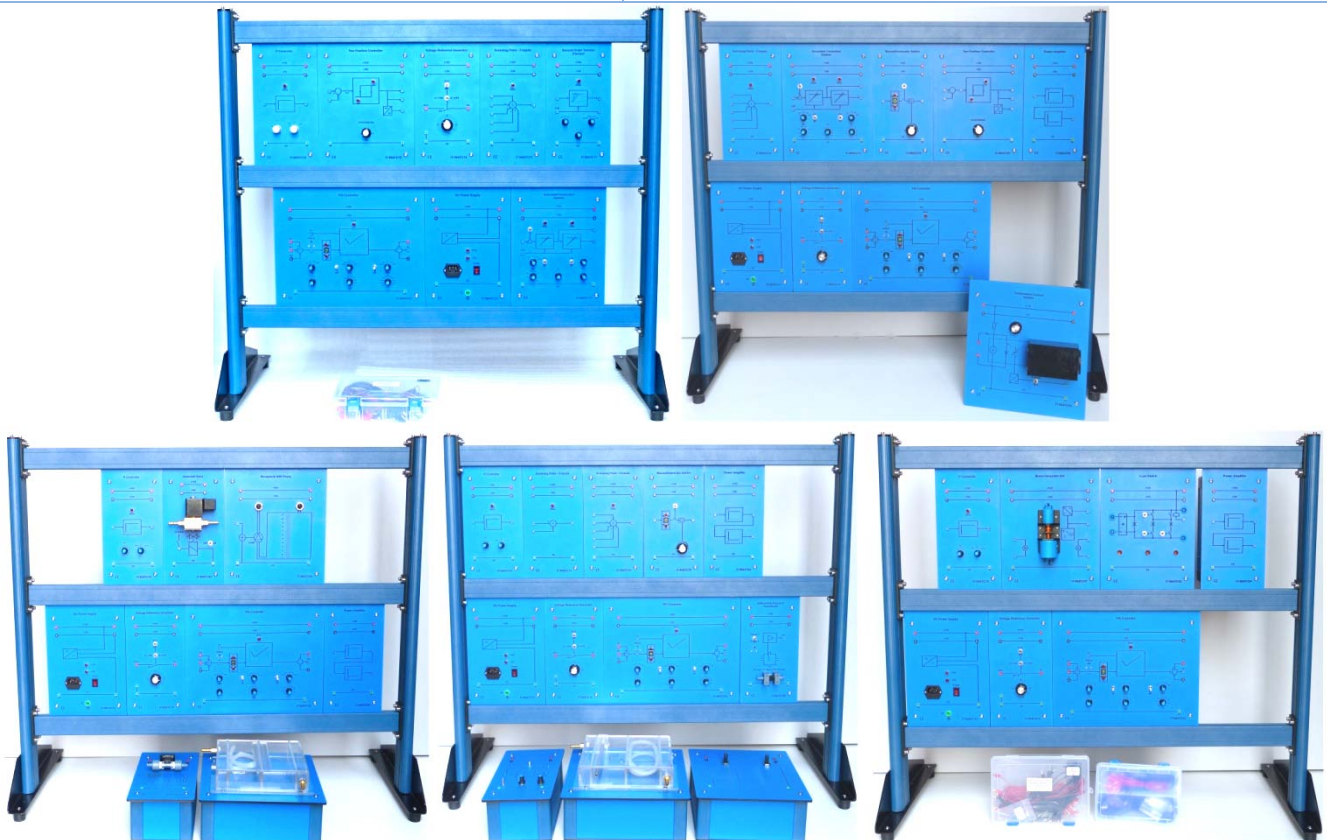
La variabile controllata può essere:

- Posizione (angolare o lineare)
- la temperatura
- la pressione
- Portata
- l'umidità
- Velocità (angolare o lineare)
- Accelerazione
- Livello di luce
- Livello sonoro

Il sistema di controllo può funzionare utilizzando principi pneumatici, idraulici o elettrici e *i sensori utilizzati per la misurazione della variabile controllata devono fornire un segnale di uscita* in una forma adatta al sistema in uso.

Questo comporta normalmente una conversione da un sistema di energia ad un altro, i dispositivi utilizzati per realizzare questa conversione di energia sono chiamati **TRASDUTTORI**.

I sensori e gli attuatori sono entrambi forme di trasduttore, i sensori rappresentano trasduttori di ingresso e gli attuatori rappresentano trasduttori di uscita.

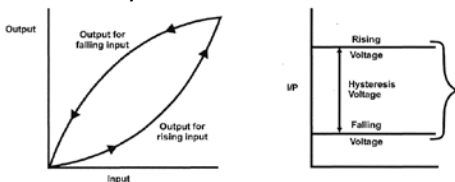


1.4 Glossary of Terms	Glossario dei termini
Transducers	Trasduttori
<p>Transducer: A device which converts information from one energy system to another.</p> <p>Sensor: A device which senses, or measures, the magnitude of system variables. Normally they also convert the measured quantity into another 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>Trasduttore: Un dispositivo che converte l'informazione da un sistema energetico ad un altro.</p> <p>Sensore: Un dispositivo che rileva, o misura, la grandezza delle variabili del sistema. Normalmente convertono anche la quantità misurata in un altro sistema di energia e quindi sono anche trasduttori.</p> <p>Attuatore: Un dispositivo che accetta un input in un sistema e lo converte in un altro sistema energetico, che normalmente è meccanico. Questi dispositivi sono anche trasduttori.</p> <p>Specifica: Dati che specificano le capacità di prestazione e i requisiti di attrezzatura.</p> <p>Precisione: L'errore presente in una misurazione rispetto al valore reale della quantità.</p> <p>Sensibilità: Il rapporto tra l'uscita di un dispositivo rispetto alla grandezza della quantità in ingresso.</p> <p>Risoluzione: Il più grande cambiamento nell'input che non produce alcun cambiamento rilevabile nell'output uscita; per esempio, il grado in cui un sistema può distinguere tra valori o impostazioni adiacenti.</p> <p>Gamma: Una dichiarazione dei valori su cui il dispositivo può essere utilizzato e all'interno dei quali la precisione è all'interno della specifica dichiarata.</p> <p>Larghezza di banda: La gamma di frequenze del segnale d'ingresso su cui un dispositivo o un circuito è in grado di funzionare fornendo un'uscita entro le specifiche dichiarate.</p> <p>Lineare: Una relazione tra due quantità che hanno un rapporto costante; per esempio, una relazione grafica a linea retta.</p> <p>Non lineare: Una relazione tra due quantità che non può essere descritta da una relazione lineare.</p> <p>Linearità: Una misura della deviazione di una misurazione da una linea retta ideale di risposta della stessa misurazione sullo stesso intervallo.</p> <p>Tempo di risposta: Il tempo impiegato dall'uscita per raggiungere, o essere entro una percentuale nominale, un nuovo valore finale, dopo che l'ingresso è stato modificato.</p>

Signal Conditioning Circuits	Circuiti di condizionamento del segnale
<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>Amplificatore: Un circuito che ha un ingresso e un'uscita che sono correlati linearmente e con l'uscita maggiore dell'ingresso. Il circuito può funzionare sia su circuiti DC che AC.</p> <p>Offset: Per un amplificatore DC, con l'ingresso zero, l'uscita potrebbe non essere zero. Questo viene chiamato offset. Con questi amplificatori, un controllo è fornito ed etichettato: "Offset" o "Set Zero" per impostare l'uscita a zero con l'ingresso zero, prima che l'amplificatore venga utilizzato.</p> <p>Guadagno: Il rapporto tra l'uscita e l'ingresso di un circuito.</p> <p>Attenuatore: Un circuito che ha un ingresso e un'uscita che sono correlati linearmente e che ha un'uscita inferiore all'ingresso.</p> <p>Amplificatore AC: Un amplificatore che amplifica solo i segnali alternati.</p> <p>Amplificatore differenziale: Un amplificatore di tensione che ha due ingressi e dove la grandezza della tensione di uscita è proporzionale alla differenza di tensione tra i due ingressi.</p> <p>Amplificatore sommatore: Un amplificatore di tensione con più ingressi, l'uscita è proporzionale alla somma dei vari ingressi applicati.</p> <p>Invertitore: Un amplificatore di tensione che ha la polarità dell'uscita inversa a quella dell'ingresso. La grandezza dell'uscita può essere la stessa dell'ingresso (guadagno di -1), o ci può essere un guadagno di tensione associato all'inversione di polarità.</p> <p>Amplificatore di potenza: Un amplificatore con una grande capacità di uscita di corrente.</p> <p>Amplificatore buffer: Un amplificatore con guadagno unitario (uscita = ingresso), e con un'alta impedenza di ingresso e una bassa impedenza di uscita.</p> <p>Comparatore: Un circuito che ha due ingressi A & B e un'uscita che può essere in uno dei due stati possibili a seconda delle grandezze degli ingressi. Con l'ingresso A maggiore di B, l'uscita sarà in uno stato (possibilmente alta tensione). Con l'ingresso A minore di B, l'uscita sarà nello stato alternativo (bassa tensione).</p> <p>Oscillatore: Un circuito che produce un'uscita alternata ad una particolare frequenza.</p> <p>Oscillatore di allarme: Un circuito che ha un ingresso e un'uscita. Con la grandezza dell'ingresso sotto un certo livello, l'uscita è zero. Quando l'ingresso supera la soglia, l'uscita è una tensione alternata.</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.

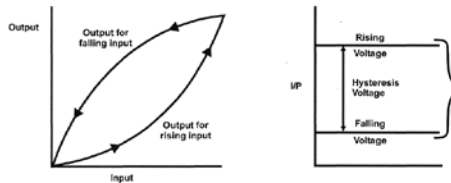
Full-Wave Rectifier: A circuit converting an alternating waveform into a unidirectional or DC waveform.

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.

Isteresi:

La caratteristica di trasferimento di un dispositivo non lineare per tensioni di ingresso crescenti può essere diversa dalla caratteristica per tensioni di ingresso decrescenti. Il risultato è un 'loop di isteresi', come mostrato nella figura sottostante. Per un circuito di commutazione, il termine 'isteresi' si riferisce normalmente alle tensioni di commutazione di ingresso. La tensione d'ingresso per causare la commutazione per tensioni d'ingresso crescenti è disposta per essere più alta di quella per produrre la commutazione per tensioni d'ingresso decrescenti (vedi figura sotto). La differenza tra le tensioni d'ingresso è chiamata isteresi.



Latch: Un circuito che ha due possibili stati di uscita a seconda dell'entità della tensione d'ingresso. Quando viene azionato con un livello d'ingresso sufficiente a cambiare l'uscita nel suo stato alternativo, l'uscita viene mantenuta (o bloccata) in questo stato indipendentemente dalla successiva grandezza della tensione d'ingresso.

Filtro: Circuito progettato per far passare i segnali di una gamma di frequenza selezionata e fermare tutti gli altri.

Filtro passa-basso: Un circuito che permette ai segnali a bassa frequenza di passare mentre blocca il passaggio delle frequenze più alte.

Filtro passa alto: Un circuito che permette ai segnali ad alta frequenza di passare mentre blocca il passaggio delle frequenze più alte.

Filtro passa banda: Un circuito che permette il passaggio di segnali in una gamma selezionata di frequenze mentre blocca il passaggio di segnali a frequenze più basse e più alte.

Raddrizzatore a onda intera: Un circuito che converte una forma d'onda alternata in una forma d'onda unidirezionale o DC.

Convertitore V/F: Un circuito che converte una tensione d'ingresso DC in una tensione alternata, la cui frequenza dipende dalla grandezza della tensione d'ingresso DC.

Convertitore F/V: Un circuito che converte una tensione alternata in ingresso in una tensione diretta in uscita, la cui grandezza della tensione in uscita è proporzionale alla frequenza della tensione in ingresso.

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).

Convertitore V/I: Un circuito che converte una tensione d'ingresso diretta in una corrente d'uscita, la cui grandezza della corrente dipende dalla tensione d'ingresso.

Convertitore I/V: Un circuito che converte una corrente d'ingresso in una tensione d'uscita, la cui grandezza della tensione dipende dalla grandezza della corrente d'ingresso.

Integratore: Un circuito che ha una tensione di uscita che è proporzionale al prodotto (tensione di ingresso x tempo).

Differenziatore: Un circuito che ha una tensione di uscita che è proporzionale al tasso di variazione della tensione di ingresso.

Sample and Hold: Un circuito con ingresso e uscita. Nello stato di campionamento, la tensione di uscita è uguale e segue la tensione di ingresso. Nello stato di hold, la tensione di uscita è mantenuta al valore del segnale di ingresso nell'istante in cui il segnale di "hold" è stato avviato.

Ultrasuoni: Un segnale a una frequenza superiore alla normale gamma audio e quindi non udibile dall'orecchio umano (normalmente > 16kHz).

-IT.96ATC-TC

TEMPERATURE CONTROL

- Two position controller in the temperature process
- Two position controller with delayed feedback in the temperature process
- Two position controller with elastic feedback in the temperature process
- Three range controller in the temperature process
- P, PI and PID controls of the temperature process using the CHR method

-IT.96ATC-LC

LEVEL CONTROL

-IT.96ATC-FC

FLOW CONTROL

- Pump's features
- Measurement system's features
- Level/Flow process features
- Level/Flow control with adjuster P
- Level/Flow control with adjuster PI
- Level/Flow control with adjuster PID
- Level/Flow control with a 2 position controller

-IT.96ATC-MT

CONTROL OF A DC MOTOR

- P, PI and PID controls of the speed of a DC motor using the CHR method
- Control of a DC generator

-IT.96ATC-BS

SIMULATED CONTROLLED SYSTEM

- 1st order process
- 2nd order I control, I-type processes
- Higher than 1st order process
- P controller
- I controller
- D controller
- PI controller
- PD controller
- PID controller
- P control, P-type process
- P control, 1st and higher order processes
- Ziegler-Nichols dynamic method
- Chien-Hrones-Reswick static method
- 2 position controller, 1st order process
- 2 position controller, delayed feedback, 2nd order process
- 2 position controller, elastic feedback, 2nd order process

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