Basic Concept of Control System

Control Engineering is concerned with techniques that are used to solve the following six problems in the most efficient manner possible.

(a)The identification problem: to measure the variables and convert data for analysis.

(b)The representation problem: to describe a system by an analytical form or mathematical model

(c)The solution problem: to determine the above system model response.

(d)The stability problem: general qualitative analysis of the system

(e)The design problem: modification of an existing system or develop a new one

(f)The optimization problem: from a variety of design to choose the best.

The two basic approaches to solve these six problems are conventional and modern approach. The electrical oriented conventional approach is based on complex function theory. The modern approach has mechanical orientation and based on the state variable theory. Therefore, control engineering is not limited to any engineering discipline but is equally applicable to aeronautical, chemical, mechanical, environmental, civil and electrical engineering. For example, a control system often includes electrical, mechanical and chemical components. Furthermore, as the understanding of the dynamics of business, social and political systems increases; the ability to control these systems will also increase.

A control system manages commands, directs or regulates the behavior of other devices or systems using control loops. It can range from a single home heating controller using a thermostat controlling a domestic boiler to large Industrial control systems which are used for controlling processes or machines. A control system is a system, which provides the desired response by controlling the output. The following figure shows the simple block diagram of a control system.

Examples − Traffic lights control system, washing machine

Traffic lights control system is an example of control system. Here, a sequence of input signal is applied to this control system and the output is one of the three lights that will be on for some duration of time. During this time, the other two lights will be off. Based on the traffic study at a particular junction, the on and off times of the lights can be determined. Accordingly, the input signal controls the output. So, the traffic lights control system operates on time basis.

नियंत्रण प्रणाली की मूल अवधारणा:

नियंत्रण इंजीनियरिंग उन तकनीकों से संबंधित है जिनका उपयोग निम्नलिखित छह समस्याओं को यथासंभव सबसे कुशल तरीके से हल करने के लिए किया जाता है।

(ए) पहचान समस्या: चर को मापना और विश्लेषण के लिए डेटा को परिवर्तित करना।

(बी) प्रतिनिधित्व समस्या: विश्लेषणात्मक रूप या गणितीय मॉडल द्वारा किसी प्रणाली का वर्णन करना

(सी) समाधान समस्या: उपरोक्त सिस्टम मॉडल प्रतिक्रिया निर्धारित करना।

(डी) स्थिरता समस्या: सिस्टम का सामान्य गुणात्मक विश्लेषण

(ई) डिज़ाइन समस्या: मौजूदा सिस्टम का संशोधन या एक नया विकसित करना

(एफ) अनुकूलन समस्या: विभिन्न प्रकार के डिज़ाइन में से सर्वश्रेष्ठ का चयन करना।

इन छह समस्याओं को हल करने के लिए दो बुनियादी दृष्टिकोण पारंपरिक और आधुनिक दृष्टिकोण हैं। विद्युत उन्मुख पारंपरिक दृष्टिकोण जटिल कार्य सिद्धांत पर आधारित है। आधुनिक दृष्टिकोण में यांत्रिक अभिविन्यास है और यह राज्य चर सिद्धांत पर आधारित है। इसलिए, नियंत्रण इंजीनियरिंग किसी भी इंजीनियरिंग अनुशासन तक सीमित नहीं है, बल्कि वैमानिकी, रासायनिक, यांत्रिक, पर्यावरण, सिविल और विद्युत इंजीनियरिंग के लिए समान रूप से लागू है। उदाहरण के लिए, एक नियंत्रण प्रणाली में अक्सर विद्युत, यांत्रिक और रासायनिक घटक शामिल होते हैं। इसके अलावा, जैसे-जैसे व्यवसाय, सामाजिक और राजनीतिक प्रणालियों की गतिशीलता की समझ बढ़ती है; इन प्रणालियों को नियंत्रित करने की क्षमता भी बढ़ेगी।

एक नियंत्रण प्रणाली आदेशों का प्रबंधन करती है, नियंत्रण लूप का उपयोग करके अन्य उपकरणों या प्रणालियों के व्यवहार को निर्देशित या विनियमित करती है। यह एक एकल घरेलू हीटिंग नियंत्रक से लेकर घरेलू बॉयलर को नियंत्रित करने वाले थर्मोस्टेट का उपयोग करके बड़े औद्योगिक नियंत्रण प्रणालियों तक हो सकता है जिनका उपयोग प्रक्रियाओं या मशीनों को नियंत्रित करने के लिए किया जाता है। एक नियंत्रण प्रणाली एक प्रणाली है, जो आउटपुट को नियंत्रित करके वांछित प्रतिक्रिया प्रदान करती है। निम्नलिखित चित्र एक नियंत्रण प्रणाली का सरल ब्लॉक आरेख दिखाता है।

उदाहरण − ट्रैफ़िक लाइट नियंत्रण प्रणाली, वॉशिंग मशीन

ट्रैफ़िक लाइट नियंत्रण प्रणाली नियंत्रण प्रणाली का एक उदाहरण है। यहाँ, इनपुट सिग्नल का एक क्रम इस नियंत्रण प्रणाली पर लागू होता है और आउटपुट तीन लाइटों में से एक है जो कुछ समय के लिए चालू रहेगी। इस दौरान, अन्य दो लाइटें बंद रहेंगी। किसी विशेष जंक्शन पर ट्रैफ़िक अध्ययन के आधार पर, लाइटों के चालू और बंद होने का समय निर्धारित किया जा सकता है। तदनुसार, इनपुट सिग्नल आउटपुट को नियंत्रित करता है। इसलिए, ट्रैफ़िक लाइट नियंत्रण प्रणाली समय के आधार पर काम करती है।

Basic terminologies in control system

System: A combination or arrangement of a number of different physical components to form a whole unit such that that combining unit performs to achieve a certain goal.

Control: The action to command, direct or regulate a system.

Plant or process: The part or component of a system that is required to be controlled.

Input: It is the signal or excitation supplied to a control system.

Output: It is the actual response obtained from the control system.

Controller: The part or component of a system that controls the plant.

Disturbances: The signal that has adverse effect on the performance of a control system.

Control system: A system that can command, direct or regulate itself or another system to achieve a certain goal.

Automation: The control of a process by automatic means

Control System: An interconnection of components forming a system configuration that will provide a desired response.

Actuator: It is the device that causes the process to provide the output. It is the device that provides the motive power to the process.

Design: The process of conceiving or inventing the forms, parts, and details of system to achieve a specified purpose.

Simulation: A model of a system that is used to investigate the behavior of a system by utilizing actual input signals.

Optimization: The adjustment of the parameters to achieve the most favorable or advantageous design.

Feedback Signal: A measure of the output of the system used for feedback to control the system.

Negative feedback: The output signal is feedback so that it subtracts from the input signal.

Block diagrams: Unidirectional, operational blocks that represent the transfer functions of the elements of the system.

Signal Flow Graph (SFG): A diagram that consists of nodes connected by several directed branches and that is a graphical representation of a set of linear relations.

Specifications: Statements that explicitly state what the device or product is to be and to do. It is also defined as a set of prescribed performance criteria.

Open-loop control system: A system that utilizes a device to control the process without using feedback. Thus the output has no effect upon the signal to the process.

Closed-loop feedback control system: A system that uses a measurement of the output and compares it with the desired output.

Regulator: The control system where the desired values of the controlled outputs are more or less fixed and the main problem is to reject disturbance effects.

Servo system: The control system where the outputs are mechanical quantities like acceleration, velocity or position.

Stability: It is a notion that describes whether the system will be able to follow the input command. In a non-rigorous sense, a system is said to be unstable if its output is out of control or increases without bound.

Multivariable Control System: A system with more than one input variable or more than one output variable.

Trade-off: The result of making a judgment about how much compromise must be made between conflicting criteria.

नियंत्रण प्रणाली में बुनियादी शब्दावली:

प्रणाली: एक संपूर्ण इकाई बनाने के लिए कई अलग-अलग भौतिक घटकों का संयोजन या व्यवस्था, ताकि वह संयोजन इकाई एक निश्चित लक्ष्य को प्राप्त करने के लिए कार्य करे।

नियंत्रण: किसी प्रणाली को आदेश देने, निर्देशित करने या विनियमित करने की क्रिया।

संयंत्र या प्रक्रिया: किसी प्रणाली का वह भाग या घटक जिसे नियंत्रित करने की आवश्यकता होती है।

इनपुट: यह नियंत्रण प्रणाली को दिया जाने वाला संकेत या उत्तेजना है।

आउटपुट: यह नियंत्रण प्रणाली से प्राप्त वास्तविक प्रतिक्रिया है।

नियंत्रक: किसी प्रणाली का वह भाग या घटक जो संयंत्र को नियंत्रित करता है।

गड़बड़ी: वह संकेत जिसका नियंत्रण प्रणाली के प्रदर्शन पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है।

नियंत्रण प्रणाली: एक प्रणाली जो किसी निश्चित लक्ष्य को प्राप्त करने के लिए खुद को या किसी अन्य प्रणाली को आदेश दे सकती है, निर्देशित कर सकती है या विनियमित कर सकती है।

स्वचालन: स्वचालित साधनों द्वारा किसी प्रक्रिया का नियंत्रण

नियंत्रण प्रणाली: घटकों का एक अंतर्संबंध जो एक प्रणाली विन्यास बनाता है जो एक वांछित प्रतिक्रिया प्रदान करेगा।

एक्ट्यूएटर: यह वह उपकरण है जो प्रक्रिया को आउटपुट प्रदान करने का कारण बनता है। यह वह उपकरण है जो प्रक्रिया को प्रेरक शक्ति प्रदान करता है।

डिजाइन: किसी निर्दिष्ट उद्देश्य को प्राप्त करने के लिए सिस्टम के रूपों, भागों और विवरणों की कल्पना या आविष्कार करने की प्रक्रिया।

सिमुलेशन: किसी सिस्टम का एक मॉडल जिसका उपयोग वास्तविक इनपुट संकेतों का उपयोग करके सिस्टम के व्यवहार की जांच करने के लिए किया जाता है।

अनुकूलन: सबसे अनुकूल या लाभप्रद डिज़ाइन प्राप्त करने के लिए मापदंडों का समायोजन।

प्रतिक्रिया संकेत: सिस्टम को नियंत्रित करने के लिए प्रतिक्रिया के लिए उपयोग किए जाने वाले सिस्टम के आउटपुट का एक माप।

नकारात्मक प्रतिक्रिया: आउटपुट सिग्नल प्रतिक्रिया है ताकि यह इनपुट सिग्नल से घट जाए।

ब्लॉक आरेख: एकदिशीय, परिचालन ब्लॉक जो सिस्टम के तत्वों के हस्तांतरण कार्यों का प्रतिनिधित्व करते हैं।

सिग्नल फ्लो ग्राफ (SFG): एक आरेख जिसमें कई निर्देशित शाखाओं द्वारा जुड़े नोड्स होते हैं और जो रैखिक संबंधों के एक सेट का एक ग्राफिकल प्रतिनिधित्व होता है।

विनिर्देश: कथन जो स्पष्ट रूप से बताते हैं कि डिवाइस या उत्पाद क्या होना चाहिए और क्या करना चाहिए। इसे निर्धारित प्रदर्शन मानदंडों के एक सेट के रूप में भी परिभाषित किया गया है।

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम: एक सिस्टम जो फीडबैक का उपयोग किए बिना प्रक्रिया को नियंत्रित करने के लिए डिवाइस का उपयोग करता है। इस प्रकार आउटपुट का प्रक्रिया के सिग्नल पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है।

क्लोज्ड-लूप फीडबैक कंट्रोल सिस्टम: एक सिस्टम जो आउटपुट के माप का उपयोग करता है और इसकी तुलना वांछित आउटपुट से करता है।

रेगुलेटर: वह नियंत्रण प्रणाली जहाँ नियंत्रित आउटपुट के वांछित मान कमोबेश निश्चित होते हैं और मुख्य समस्या गड़बड़ी के प्रभावों को अस्वीकार करना है।

सर्वो सिस्टम: वह नियंत्रण प्रणाली जहाँ आउटपुट त्वरण, वेग या स्थिति जैसी यांत्रिक मात्राएँ होती हैं।

स्थिरता: यह एक धारणा है जो वर्णन करती है कि सिस्टम इनपुट कमांड का पालन करने में सक्षम होगा या नहीं। गैर-कठोर अर्थ में, एक सिस्टम को अस्थिर कहा जाता है यदि उसका आउटपुट नियंत्रण से बाहर हो या बिना सीमा के बढ़ता हो।

मल्टीवेरिएबल कंट्रोल सिस्टम: एक से अधिक इनपुट वेरिएबल या एक से अधिक आउटपुट वेरिएबल वाली प्रणाली।

ट्रेड-ऑफ: परस्पर विरोधी मानदंडों के बीच कितना समझौता किया जाना चाहिए, इस बारे में निर्णय लेने का परिणाम।

The objectives of a control system include:

- **Operational efficiency**: Ensure that activities are performed as per standards, and avoid unnecessary actions
- **Cost-effectiveness**: Determine the best action to take with the least amount of time, effort, and cost
- **Disturbance rejection**: Reduce the impact of disturbances on the system's performance
- **Stability**: Understand how the system will respond to different inputs and disturbances
- **Predictive**: Anticipate deviations and take corrective action before they cause financial losses
- **Compliance**: Ensure that the organization complies with laws and regulations
- **Accuracy**: Ensure that financial reporting is accurate and reliable
- **Effectiveness**: Ensure that the organization's operations are effective

नियंत्रण प्रणाली के उद्देश्यों में शामिल हैं:

• **परिचालन दक्षता:** सुनिश्चित करें कि गतिविधियाँ मानकों के अनुसार की जाती हैं, और अनावश्यक कार्यों से बचें

• **लागत-प्रभावशीलता:** कम से कम समय, प्रयास और लागत के साथ सबसे अच्छी कार्रवाई निर्धारित करें

• **गड़बड़ी अस्वीकृति:** सिस्टम के प्रदर्शन पर गड़बड़ी के प्रभाव को कम करें

• **स्थिरता:** समझें कि सिस्टम विभिन्न इनपुट और गड़बड़ी पर कैसे प्रतिक्रिया देगा

• **पूर्वानुमान:** विचलन की आशंका करें और वित्तीय नुकसान का कारण बनने से पहले सुधारात्मक कार्रवाई करें

• **अनुपालन:** सुनिश्चित करें कि संगठन कानूनों और विनियमों का अनुपालन करता है

• **सटीकता:** सुनिश्चित करें कि वित्तीय रिपोर्टिंग सटीक और विश्वसनीय है

• **प्रभावशीलता:** सुनिश्चित करें कि संगठन के संचालन प्रभावी हैं

Classification of control system:

- **Natural control system and Man-made control system:**

Natural control system: It is a control system that is created by nature, i.e. solar system, digestive system of any animal, etc.

Man-made control system: It is a control system that is created by humans, i.e. automobile, power plants etc.

- **Automatic control system and Combinational control system:**

Automatic control system: It is a control system that is made by using basic theories from mathematics and engineering. This system mainly has sensors, actuators and responders.

Combinational control system: It is a control system that is a combination of natural and man-made control systems, i.e. driving a car etc.

- **Time-variant control system and Time-invariant control system:**

Time-variant control system: It is a control system where any one or more parameters of the control system vary with time i.e. driving a vehicle.

Time-invariant control system: It is a control system where none of its parameters vary with time i.e. control system made up of inductors, capacitors and resistors only.

- **Linear control system and Non-linear control system:**

Linear control system: It is a control system that satisfies properties of homogeneity and additive.

Homogeneous property: $f(x+y) = f(x) + f(y)$

Additive property: $f(ax) = af(x)$

Non-linear control system: It is a control system that does not satisfy properties of homogeneity and additive, i.e. $f(x) = x^3$

- **Continuous-Time control system and Discrete-Time control system:**

Continuous-Time control system: It is a control system where performances of all of its parameters are function of time, i.e. armature type speed control of motor.

Discrete -Time control system: It is a control system where performances of all of its parameters are function of discrete time i.e. microprocessor type speed control of motor.

- **Deterministic control system and Stochastic control system:**

Deterministic control system: It is a control system where its output is predictable or repetitive for certain input signal or disturbance signal.

Stochastic control system: It is a control system where its output is unpredictable or non-repetitive for certain input signal or disturbance signal.

- **Lumped-parameter control system and Distributed-parameter control system:**

Lumped-parameter control system: It is a control system where its mathematical model is represented by ordinary differential equations.

Distributed-parameter control system: It is a control system where its mathematical model is represented by an electrical network that is a combination of resistors, inductors and capacitors.

- **Single-input-single-output (SISO) control system and Multi-input-multi-output (MIMO) control system:**

SISO control system: It is a control system that has only one input and one output.

MIMO control system: It is a control system that has only more than one input and more than one output.

- **Open-loop control system and Closed-loop control system:**

Open-loop control system: It is a control system where its control action only depends on input signal and does not depend on its output response.

Closed-loop control system: It is a control system where its control action depends on both of its input signal and output response.

नियंत्रण प्रणाली का वर्गीकरण:

- **प्राकृतिक नियंत्रण प्रणाली और मानव निर्मित नियंत्रण प्रणाली:**

प्राकृतिक नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो प्रकृति द्वारा बनाई गई है, यानी सौर मंडल, किसी जानवर का पाचन तंत्र, आदि।

मानव निर्मित नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो मनुष्यों द्वारा बनाई गई है, यानी ऑटोमोबाइल, बिजली संयंत्र आदि।

- **स्वचालित नियंत्रण प्रणाली और संयोजन नियंत्रण प्रणाली:**

स्वचालित नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो गणित और इंजीनियरिंग के बुनियादी सिद्धांतों का उपयोग करके बनाई गई है। इस प्रणाली में मुख्य रूप से सेंसर, एक्ट्यूएटर और रिस्पॉन्डर होते हैं।
संयोजन नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो प्राकृतिक और मानव निर्मित नियंत्रण प्रणालियों का संयोजन है, यानी कार चलाना आदि।

- **समय-भिन्न नियंत्रण प्रणाली और समय-अपरिवर्तनीय नियंत्रण प्रणाली:**

समय-भिन्न नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ नियंत्रण प्रणाली का कोई एक या अधिक पैरामीटर समय के साथ बदलता रहता है यानी वाहन चलाना।
समय-अपरिवर्तनीय नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है, जिसमें कोई भी पैरामीटर समय के साथ परिवर्तित नहीं होता है, अर्थात् यह नियंत्रण प्रणाली केवल प्रेरकों, संधारित्रों और प्रतिरोधकों से बनी होती है।

- **रैखिक नियंत्रण प्रणाली और गैर-रैखिक नियंत्रण प्रणाली:**

रैखिक नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो समरूपता और योगात्मक के गुणों को संतुष्ट करती है।

सजातीय गुण: $f(x+y) = f(x) + f(y)$

योगात्मक गुण: $f(ax) = af(x)$
गैर-रैखिक नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जो समरूपता और योगात्मक के गुणों को संतुष्ट नहीं करती है, अर्थात $f(x) = x^3$

- **सतत-समय नियंत्रण प्रणाली और असतत-समय नियंत्रण प्रणाली:**

सतत-समय नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसके सभी मापदंडों का प्रदर्शन समय के अनुसार होता है, अर्थात मोटर का आर्मेचर प्रकार गति नियंत्रण।
असतत-समय नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसके सभी मापदंडों का प्रदर्शन असतत समय के अनुसार होता है, अर्थात मोटर का माइक्रोप्रोसेसर प्रकार गति नियंत्रण।

- **नियतात्मक नियंत्रण प्रणाली और स्टोकेस्टिक नियंत्रण प्रणाली:**

नियतात्मक नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसका आउटपुट कुछ इनपुट सिग्नल या गड़बड़ी सिग्नल के लिए पूर्वानुमान योग्य या दोहरावदार होता है।

स्टोकेस्टिक नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसका आउटपुट कुछ इनपुट सिग्नल या गड़बड़ी सिग्नल के लिए अप्रत्याशित या गैर-दोहरावदार होता है।

- **संकुलित-पैरामीटर नियंत्रण प्रणाली और वितरित-पैरामीटर नियंत्रण प्रणाली:**

संकुलित-पैरामीटर नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसका गणितीय मॉडल साधारण अंतर समीकरणों द्वारा दर्शाया जाता है।
वितरित-पैरामीटर नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसका गणितीय मॉडल एक विद्युत नेटवर्क द्वारा दर्शाया जाता है जो प्रतिरोधकों, प्रेरकों और संधारित्रों का संयोजन होता है।

- **सिंगल-इनपुट-सिंगल-आउटपुट (SISO) नियंत्रण प्रणाली और मल्टी-इनपुट-मल्टी-आउटपुट (MIMO) नियंत्रण प्रणाली:**

SISO नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें केवल एक इनपुट और एक आउटपुट होता है।
MIMO नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें केवल एक से अधिक इनपुट और एक से अधिक आउटपुट होते हैं।

- **ओपन-लूप नियंत्रण प्रणाली और क्लोज्ड-लूप नियंत्रण प्रणाली:**

ओपन-लूप नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसकी नियंत्रण क्रिया केवल इनपुट सिग्नल पर निर्भर करती है और इसकी आउटपुट प्रतिक्रिया पर निर्भर नहीं करती है।
क्लोज्ड-लूप नियंत्रण प्रणाली: यह एक नियंत्रण प्रणाली है जहाँ इसकी नियंत्रण क्रिया इसके इनपुट सिग्नल और आउटपुट प्रतिक्रिया दोनों पर निर्भर करती है।

Effects of feedback system:

Feedback systems play a crucial role in various domains, including engineering, business, education, and biology. The effects of feedback systems can be broadly classified into **positive effects** and **negative effects**, depending on how feedback is managed and its influence on the system.

1. Positive Effects of Feedback Systems

✅ **Stability and Regulation** – Feedback helps maintain equilibrium in a system by adjusting responses based on input. For example, in biological systems, homeostasis (such as body temperature regulation) relies on feedback loops.

✅ **Improved Performance** – In business and education, feedback helps individuals and organizations refine their strategies, improve skills, and enhance productivity.

✅ **Adaptation and Learning** – Feedback enables continuous improvement by helping a system adapt to changing conditions. AI models, for example, use feedback to learn and improve accuracy over time.

✅ **Error Correction** – Negative feedback helps reduce errors and prevent deviations from desired outcomes, ensuring precision in systems like autopilot controls and thermostats.

✅ **Efficiency Optimization** – Feedback allows systems to adjust their operations for maximum efficiency, such as in energy management or production systems.

2. Negative Effects of Feedback Systems

⚠ **Instability and Oscillations** – Poorly designed feedback loops can cause excessive corrections, leading to instability or oscillations (e.g., a poorly tuned thermostat rapidly turning on and off).

⚠ **Delays and Lag** – Feedback with a delayed response can lead to inefficient control, causing overshooting or slow reactions (e.g., delays in economic policy changes leading to inflation spikes).

⚠ **Overcorrection or Saturation** – Excessive feedback can overwhelm a system, leading to extreme or unintended behaviors, such as micromanagement in organizations reducing employee autonomy.

⚠ **Reinforcement of Undesirable Behaviors** – Positive feedback in the wrong context can amplify problems. For example, in social media, algorithms reinforcing biased content can create echo chambers.

फीडबैक सिस्टम के प्रभाव:

फीडबैक सिस्टम किसी भी प्रणाली (system) को नियंत्रित (control) और सुधारने (improve) में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। इसके प्रभाव सकारात्मक (positive) और नकारात्मक (negative) दोनों हो सकते हैं।

---

1. सकारात्मक प्रभाव (Positive Effects)

✅ **स्थिरता और नियंत्रण (Stability and Regulation)** – फीडबैक प्रणाली को संतुलित रखने में मदद करता है, जैसे कि हमारे शरीर में **होमियोस्टेसिस (homeostasis)** जो तापमान (temperature) को नियंत्रित करता है।

✅ **प्रदर्शन में सुधार (Improved Performance)** – शिक्षा (education) और व्यापार (business) में फीडबैक से कौशल (skills) और रणनीति (strategies) बेहतर होती हैं।

✅ **अनुकूलन और सीखने की क्षमता (Adaptation and Learning)** – फीडबैक से सिस्टम लगातार नई परिस्थितियों के अनुसार खुद को ढाल सकता है, जैसे कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) एल्गोरिदम जो उपयोगकर्ताओं की पसंद के अनुसार सुधार होते हैं।

✅ **त्रुटियों का सुधार (Error Correction)** – नकारात्मक फीडबैक (negative feedback) त्रुटियों को कम करता है और प्रणाली को अधिक सटीक बनाता है, जैसे कि ऑटो पायलट सिस्टम।

✅ **क्षमता में वृद्धि (Efficiency Optimization)** – फीडबैक से सिस्टम अधिक कुशल बनते हैं, जैसे ऊर्जा प्रबंधन प्रणाली (energy management systems)।

---

2. नकारात्मक प्रभाव (Negative Effects)

⚠ **अस्थिरता और दोलन (Instability and Oscillations)** – गलत तरीके से डिज़ाइन किया गया फीडबैक सिस्टम अत्यधिक सुधार (overcorrection) के कारण अस्थिर हो सकता है, जैसे खराब ट्यून किया गया थर्मोस्टेट जो बार-बार चालू और बंद होता है।

⚠ **देरी और विलंब (Delays and Lag)** – यदि फीडबैक देरी से मिलता है, तो यह सही निर्णय लेने में बाधा बन सकता है, जैसे आर्थिक नीतियों (economic policies) में देरी जिससे महंगाई (inflation) बढ़ सकती है।

⚠ **अत्यधिक सुधार (Overcorrection)** – जब बहुत अधिक फीडबैक दिया जाता है, तो यह प्रणाली को अधिभारित (overload) कर सकता है, जैसे कंपनियों में **माइक्रोमैनेजमेंट (micromanagement)** जो कर्मचारियों की स्वतंत्रता को सीमित करता है।

⚠ **गलत व्यवहार को बढ़ावा (Reinforcement of Undesirable Behavior)** – गलत तरीके से दिया गया सकारात्मक फीडबैक (positive feedback) समस्या को बढ़ा सकता है, जैसे सोशल मीडिया एल्गोरिदम जो पक्षपाती (biased) सामग्री को बढ़ावा देते हैं।

Basic elements of open loop system:

An **open-loop system** is a type of control system where the output does not influence the input. It operates based on a predetermined input and does not adjust based on feedback. The **basic elements** of an open-loop system include:

1. **Input** – The external signal or command that initiates the operation of the system.
2. **Controller** – A device or mechanism that processes the input and sends a control signal to the actuator.
3. **Actuator (Process)** – The component that executes the action based on the control signal, such as a motor or heating element.
4. **Output** – The final result or response of the system, such as movement, temperature change, or speed.

Key Characteristics:

- No feedback mechanism
- Simple and cost-effective
- Prone to errors due to external disturbances

Example: Electric Kettle

- **Input:** User sets the power level.
- **Controller:** Electrical circuit supplies power to the heating element.
- **Actuator:** Heating element warms the water.
- **Output:** Water gets heated.

Since there is no automatic adjustment based on the actual water temperature, this is an open-loop system.

ओपन लूप सिस्टम के मूल तत्व:

ओपन-लूप सिस्टम एक ऐसा नियंत्रण प्रणाली (Control System) है जिसमें आउटपुट का इनपुट पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है। यह पहले से निर्धारित इनपुट पर काम करता है और इसमें फीडबैक सिस्टम नहीं होता। इसके मुख्य तत्व निम्नलिखित हैं:

1. **इनपुट (Input)** - बाहरी संकेत (Signal) या कमांड जो सिस्टम की क्रिया को प्रारंभ करता है।
2. **नियंत्रक (Controller)** - वह यंत्र या उपकरण जो इनपुट सिग्नल को प्रोसेस करता है और एक कंट्रोल सिग्नल उत्पन्न करता है।
3. **एक्चुएटर (Actuator) / प्रक्रिया (Process)** - वह घटक जो कंट्रोल सिग्नल के अनुसार क्रिया करता है, जैसे मोटर या हीटिंग एलिमेंट।
4. **आउटपुट (Output)** - सिस्टम का अंतिम परिणाम या प्रतिक्रिया, जैसे गति, तापमान परिवर्तन, या गति का स्तर।

मुख्य विशेषताएँ:

- इसमें कोई फीडबैक तंत्र नहीं होता।
- यह सरल और किफायती होता है।
- बाहरी व्यवधानों (Disturbances) के कारण इसमें त्रुटियाँ हो सकती हैं।

उदाहरण: इलेक्ट्रिक केतली (Electric Kettle)

- **इनपुट:** उपयोगकर्ता बिजली चालू करता है।
- **नियंत्रक:** इलेक्ट्रिक सर्किट हीटिंग एलिमेंट को बिजली भेजता है।
- **एक्चुएटर:** हीटिंग एलिमेंट पानी को गर्म करता है।
- **आउटपुट:** पानी गर्म हो जाता है।

चूंकि यह सिस्टम आउटपुट के अनुसार अपने आप समायोजन नहीं करता, इसलिए यह एक ओपन-लूप सिस्टम है।

Basic Elements of a Closed-Loop System:

A **closed-loop system** is a type of control system where the output is continuously monitored and compared with the desired input to make necessary adjustments. This system includes a feedback mechanism that helps maintain accuracy and stability.

Main Elements of a Closed-Loop System:

1. **Input (Reference Signal)** – The desired value or setpoint that the system aims to achieve.
2. **Controller** – A device that processes the input signal and generates a control action based on the error signal.

3. **Actuator (Process/Plant)** – The component that carries out the required action based on the controller's command.
4. **Output** – The actual response of the system, such as speed, temperature, or position.
5. **Feedback Sensor** – A device that measures the actual output and sends it back to the controller.
6. **Comparator (Error Detector)** – Compares the actual output with the desired input and generates an error signal, which is used to adjust the system.

Key Characteristics:

- Uses feedback to adjust performance.
- More accurate and stable compared to open-loop systems.
- Can self-correct errors and disturbances.

Example: Air Conditioner (Thermostat-Based AC)

- **Input:** Desired temperature is set (e.g., 24°C).
- **Controller:** Thermostat processes the input and sends signals to the compressor.
- **Actuator:** The compressor adjusts cooling based on the signal.
- **Output:** Room temperature changes.
- **Feedback Sensor:** Temperature sensor measures the actual temperature.
- **Comparator:** If the room temperature deviates from the set value, the system makes adjustments accordingly.

Because this system continuously monitors and adjusts itself, it is a **closed-loop system**.

क्लोज़्ड लूप सिस्टम के मूल तत्व:

क्लोज़्ड-लूप सिस्टम एक प्रकार की नियंत्रण प्रणाली (Control System) होती है जिसमें आउटपुट को लगातार मापा जाता है और इनपुट के साथ तुलना की जाती है, जिससे आवश्यक समायोजन किए जा सकते हैं। इसमें **फीडबैक तंत्र** (Feedback Mechanism) शामिल होता है, जो सिस्टम को सटीक और स्थिर बनाए रखता है।

क्लोज़्ड-लूप सिस्टम के मुख्य तत्व:

1. **इनपुट (संदर्भ संकेत) [Input (Reference Signal)]** - वह वांछित मान (Desired Value) जिसे सिस्टम प्राप्त करने का प्रयास करता है।
2. **नियंत्रक (Controller)** - एक उपकरण जो इनपुट सिग्नल को प्रोसेस करता है और त्रुटि संकेत (Error Signal) के आधार पर नियंत्रण क्रिया उत्पन्न करता है।

3. **एक्चुएटर (प्रक्रिया/प्लांट) [Actuator (Process/Plant)]** - वह घटक जो नियंत्रक के आदेश के अनुसार क्रिया करता है, जैसे मोटर, हीटर, या कंप्रेसर।
4. **आउटपुट (Output)** - सिस्टम की वास्तविक प्रतिक्रिया, जैसे गति, तापमान या स्थिति।
5. **फीडबैक सेंसर (Feedback Sensor)** - एक उपकरण जो वास्तविक आउटपुट को मापता है और इसे नियंत्रक को वापस भेजता है।
6. **तुलनित्र (त्रुटि डिटेक्टर) [Comparator (Error Detector)]** - यह वास्तविक आउटपुट की तुलना इनपुट से करता है और त्रुटि सिग्नल उत्पन्न करता है, जिससे सिस्टम आवश्यक समायोजन करता है।

मुख्य विशेषताएँ:

- फीडबैक का उपयोग करके प्रदर्शन को समायोजित करता है।
- ओपन-लूप सिस्टम की तुलना में अधिक सटीक और स्थिर होता है।
- स्वतः त्रुटियों और व्यवधानों को ठीक करने की क्षमता रखता है।

उदाहरण: एयर कंडीशनर (थर्मोस्टेट-आधारित एसी)

- **इनपुट:** उपयोगकर्ता 24°C तापमान सेट करता है।
- **नियंत्रक:** थर्मोस्टेट इनपुट को प्रोसेस करता है और कंप्रेसर को सिग्नल भेजता है।
- **एक्चुएटर:** कंप्रेसर ठंडक बढ़ाता या घटाता है।
- **आउटपुट:** कमरा ठंडा या गर्म होता है।
- **फीडबैक सेंसर:** तापमान सेंसर वास्तविक तापमान को मापता है।
- **तुलनित्र:** यदि वास्तविक तापमान 24°C से अलग होता है, तो सिस्टम आवश्यक समायोजन करता है।

चूंकि यह सिस्टम लगातार मॉनिटरिंग और स्वचालित समायोजन करता है, यह एक **क्लोज़्ड-लूप सिस्टम** है।

Open Loop Control System:

An open loop control system is a type of control system in which the system's output does not have any effect on its input and, therefore, does not have any feedback.
Open loop system is also known as non feedback control system because it does not depend on the any previous output or any continuous output of the system. In this type of system input is provided to the system and the output is generated without taking any feedback from the output.

Some key points about open loop control systems include:

- Lack of feedback path from output to input
- Output is not adjusted based on actual system behavior
- Controller functions independently of system response
- Simple and economical design
- Not suitable where accuracy and tight control are required.

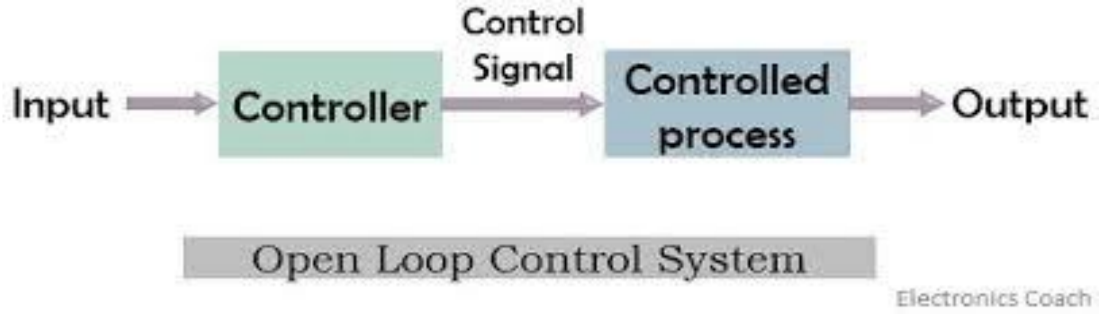
ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम:

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम एक प्रकार का कंट्रोल सिस्टम है जिसमें सिस्टम के आउटपुट का उसके इनपुट पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है और इसलिए, इसमें कोई फीडबैक नहीं होता है।
ओपन लूप सिस्टम को नॉन फीडबैक कंट्रोल सिस्टम के रूप में भी जाना जाता है क्योंकि यह सिस्टम के किसी पिछले आउटपुट या किसी निरंतर आउटपुट पर निर्भर नहीं करता है। इस प्रकार की प्रणाली में सिस्टम को इनपुट प्रदान किया जाता है और आउटपुट से कोई फीडबैक लिए बिना आउटपुट उत्पन्न किया जाता है।

- ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम के बारे में कुछ मुख्य बिंदु इस प्रकार हैं:
- आउटपुट से इनपुट तक फीडबैक पथ की कमी
- आउटपुट को वास्तविक सिस्टम व्यवहार के आधार पर समायोजित नहीं किया जाता है
- नियंत्रक सिस्टम प्रतिक्रिया से स्वतंत्र रूप से कार्य करता है
- सरल और किफायती डिज़ाइन
- जहाँ सटीकता और सख्त नियंत्रण की आवश्यकता होती है, वहाँ उपयुक्त नहीं है

Block Diagram of Open Loop Control System:

In the Open loop control system the output of the System is fixed accordingly to the input provided. It does not get influenced by the System's Feedback. The basic of the Block diagram is given below



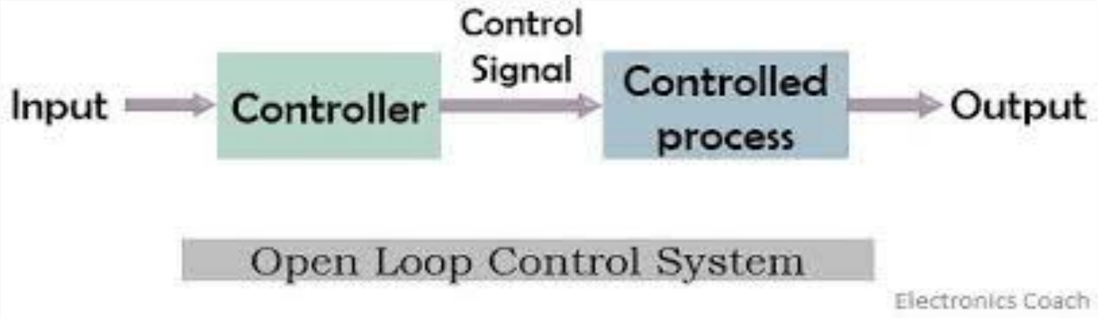
In this Block Diagram,

- **Input:** The Input represents the desired set point that the System should achieve.
- **Controller:** The Controller is like Processing block which Process the input and generates the Control signal based on the Algorithms and Commands provided to it.
- **Controlled Process:** The Controlled Process Represents the Physical System that is controlled by the Controller Block. It could Mechanical, Electrical or any other system based on the Requirements.
- **Output:** The Output is the response of the system to the control signal generated by the controller.

As seen above, the output of the plant is independent of any feedback path. The controller generates signals irrespective of whether the actual output matches the desired one or not.

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम का ब्लॉक डायग्राम:

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम में सिस्टम का आउटपुट दिए गए इनपुट के अनुसार तय होता है। यह सिस्टम के फीडबैक से प्रभावित नहीं होता। ब्लॉक डायग्राम का मूल नीचे दिया गया है



इस ब्लॉक आरेख में,

• इनपुट: इनपुट वांछित सेट पॉइंट को दर्शाता है जिसे सिस्टम को प्राप्त करना चाहिए।

• नियंत्रक: नियंत्रक प्रोसेसिंग ब्लॉक की तरह होता है जो इनपुट को प्रोसेस करता है और इसे दिए गए एल्गोरिदम और कमांड के आधार पर कंट्रोल सिग्नल जेनरेट करता है।

• नियंत्रित प्रक्रिया: नियंत्रित प्रक्रिया भौतिक प्रणाली को दर्शाती है जिसे नियंत्रक ब्लॉक द्वारा नियंत्रित किया जाता है। यह आवश्यकताओं के आधार पर मैकेनिकल, इलेक्ट्रिकल या कोई अन्य सिस्टम हो सकता है।

• आउटपुट: आउटपुट नियंत्रक द्वारा उत्पन्न नियंत्रण सिग्नल के लिए सिस्टम की प्रतिक्रिया है।

जैसा कि ऊपर देखा गया है, प्लांट का आउटपुट किसी भी फीडबैक पथ से स्वतंत्र है। नियंत्रक सिग्नल जेनरेट करता है, भले ही वास्तविक आउटपुट वांछित आउटपुट से मेल खाता हो या नहीं।

Working of Open Loop Control System:

- Firstly the input signal is converted to electronic signal through input device after detection, after this signal passes to the processor for further process.
- Then the controller converts the signal to output signal with the accuracy that the desired the output signal's value should match with input signal's value and the signal is send to output device.
- When the input signal is processed through controller and then passed to the output device then the output device converts the signal to electrical signal which controls system's output.

So that's how the open loop control system works with the process of the signal and this system is basically used where the output signal is not feedback controlled also this is simple to operate .

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम का कार्य:

• सबसे पहले इनपुट सिग्नल को डिटेक्शन के बाद इनपुट डिवाइस के माध्यम से इलेक्ट्रॉनिक सिग्नल में परिवर्तित किया जाता है, इसके बाद यह सिग्नल आगे की प्रक्रिया के लिए प्रोसेसर के पास जाता है।

• फिर कंट्रोलर सिग्नल को आउटपुट सिग्नल में इस सटीकता के साथ परिवर्तित करता है कि वांछित आउटपुट सिग्नल का मान इनपुट सिग्नल के मान से मेल खाना चाहिए और सिग्नल को आउटपुट डिवाइस पर भेज दिया जाता है।

• जब इनपुट सिग्नल को कंट्रोलर के माध्यम से प्रोसेस किया जाता है और फिर आउटपुट डिवाइस पर भेजा जाता है तो आउटपुट डिवाइस सिग्नल को इलेक्ट्रिकल सिग्नल में बदल देता है जो सिस्टम के आउटपुट को नियंत्रित करता है।

तो इस तरह से ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम सिग्नल की प्रक्रिया के साथ काम करता है और इस सिस्टम का मूल रूप से उपयोग किया जाता है जहां आउटपुट सिग्नल फीडबैक नियंत्रित नहीं होता है और इसे संचालित करना भी सरल है।

Characteristics of an Open Loop Control System:

Characteristics of the Control systems are given below

- **No Feedback:** In this System there is no feedback from the output to adjust the input of the system so, the errors and disturbances cannot be corrected.
- **Stability:** As there is absence of the feedback in the system, the errors in the system is not corrected which leads to reduce the stability of the system.
- **Fast Response:** Open loop System can provide fast feedback as there is no feedback loop present.
- **Simple Design:** These systems are simpler in design compared to closed-loop systems.

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम की विशेषताएँ:

नियंत्रण प्रणालियों की विशेषताएँ नीचे दी गई हैं

• कोई प्रतिक्रिया नहीं: इस प्रणाली में सिस्टम के इनपुट को समायोजित करने के लिए आउटपुट से कोई प्रतिक्रिया नहीं होती है, इसलिए त्रुटियों और गड़बड़ी को ठीक नहीं किया जा सकता है।

• स्थिरता: चूंकि सिस्टम में फीडबैक की अनुपस्थिति है, इसलिए सिस्टम में त्रुटियों को ठीक नहीं किया जाता है जिससे सिस्टम की स्थिरता कम हो जाती है।

• तेज़ प्रतिक्रिया: ओपन लूप सिस्टम तेज़ प्रतिक्रिया प्रदान कर सकता है क्योंकि इसमें कोई फीडबैक लूप मौजूद नहीं है।

• सरल डिज़ाइन: ये सिस्टम बंद-लूप सिस्टम की तुलना में डिज़ाइन में सरल हैं।

Applications of Open loop Control System:

Open-loop control systems are well-suited for applications where precise control and feedback are not critical. Some common applications include:

- **Light Switches:** Turning on/off a light switch is a simple open-loop control system application.
- **Simple Appliances:** Devices like blenders and toasters often use open-loop control for basic operations.
- **Traffic Signals**: Traffic lights follow predefined schedules without adjusting to real-time traffic conditions.
- **Robotics:** This system can be implemented in the simple robotics where precise feedback is not required.
- **Manufacturing Processes:** This system can be used to control parameters such as temperature, pressure ,speed based on the Set points

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम के अनुप्रयोग:

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम ऐसे अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त हैं जहाँ सटीक नियंत्रण और फीडबैक महत्वपूर्ण नहीं हैं। कुछ सामान्य अनुप्रयोगों में शामिल हैं:

• लाइट स्विच: लाइट स्विच को चालू/बंद करना एक सरल ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम अनुप्रयोग है।

• सरल उपकरण: ब्लेंडर और टोस्टर जैसे उपकरण अक्सर बुनियादी संचालन के लिए ओपन-लूप नियंत्रण का उपयोग करते हैं।

• ट्रैफ़िक सिग्नल: ट्रैफ़िक लाइटें वास्तविक समय की ट्रैफ़िक स्थितियों को समायोजित किए बिना पूर्वनिर्धारित शेड्यूल का पालन करती हैं।

• रोबोटिक्स: इस प्रणाली को सरल रोबोटिक्स में लागू किया जा सकता है जहाँ सटीक फीडबैक की आवश्यकता नहीं होती है।
• विनिर्माण प्रक्रियाएँ: इस प्रणाली का उपयोग सेट पॉइंट्स के आधार पर तापमान, दबाव, गति जैसे मापदंडों को नियंत्रित करने के लिए किया जा सकता है।

Advantages and Disadvantages of Open Loop Control System:

Advantages:

- **Cost Effectiveness**: This configuration is simple to design and cost effective since it utilizes straight network and the feedback path needs not to be considered.
- **Easy to maintain**: This configuration is easy to maintain as and when any error occurs it gets easily detected due to simplicity in the circuit design.
- **Fast response**: Due to minimal circuitry fast response is associated with this type of configuration since feedback path is not involved so the delay is also less.

Disadvantages:

- **Less accurate:** As there is no check in the output produced because feedback is not there so the accuracy of this type of system is slightly compromised.
- **Limited Adaptability:** This system works based on the Predefined inputs and doesn’t dynamically Adapts to the changes.
- **Lack of Robustness:** Due to their reliance on predetermined control signals, open-loop systems may be less robust in dealing with uncertainties or unexpected event.

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम के लाभ और नुकसान:

लाभ:

• लागत प्रभावशीलता: यह कॉन्फ़िगरेशन डिज़ाइन करने में सरल है और लागत प्रभावी है क्योंकि यह सीधे नेटवर्क का उपयोग करता है और फ़ीडबैक पथ पर विचार करने की आवश्यकता नहीं है।
• रखरखाव में आसान: इस कॉन्फ़िगरेशन को बनाए रखना आसान है क्योंकि जब कोई त्रुटि होती है तो सर्किट डिज़ाइन में सरलता के कारण इसका आसानी से पता चल जाता है।
• तेज़ प्रतिक्रिया: न्यूनतम सर्किटरी के कारण तेज़ प्रतिक्रिया इस प्रकार के कॉन्फ़िगरेशन से जुड़ी होती है क्योंकि फ़ीडबैक पथ शामिल नहीं होता है इसलिए देरी भी कम होती है।

नुकसान:

• कम सटीक: चूंकि फ़ीडबैक नहीं होने के कारण उत्पादित आउटपुट में कोई जाँच नहीं होती है इसलिए इस प्रकार की प्रणाली की सटीकता थोड़ी कम हो जाती है।
• सीमित अनुकूलनशीलता: यह सिस्टम पूर्वनिर्धारित इनपुट के आधार पर काम करता है और परिवर्तनों के लिए गतिशील रूप से अनुकूल नहीं होता है।
• मजबूती की कमी: पूर्वनिर्धारित नियंत्रण संकेतों पर निर्भरता के कारण, ओपन-लूप प्रणालियाँ अनिश्चितताओं या अप्रत्याशित घटनाओं से निपटने में कम मजबूत हो सकती हैं।

Example for Open Loop Control System:

Open-loop control systems find applications in various real-world scenarios

- **Electric Fan:** As mentioned earlier, the regulation of fan speed using a regulator is a classic example of an open-loop control system. The input is the electrical power, controller is centrally located shaft that rotates and the output is the fan's rotational speed.
- **Oven Temperature Control:** Many ovens operate based on open-loop control systems. In this case we set the desired temperature and the oven heats up to that temperature without continuously monitoring the actual temperature.
- **Washing Machine Cycle Selection:** When we choose a washing machine cycle based on the type of clothes, the machine follows a predefined program without constantly measuring the water temperature or the state of the clothes.
- **Remote Control for Electronic Devices:** Remote controls for TVs and other electronic devices send commands without receiving feedback about whether the device successfully executed the command.

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टम का उदाहरण:

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम का इस्तेमाल कई तरह के वास्तविक परिदृश्यों में किया जाता है
• इलेक्ट्रिक पंखा: जैसा कि पहले बताया गया है, रेगुलेटर का इस्तेमाल करके पंखे की गति को नियंत्रित करना ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम का एक बेहतरीन उदाहरण है। इनपुट विद्युत शक्ति है, कंट्रोलर केंद्र में स्थित शाफ्ट है जो घूमता है और आउटपुट पंखे की घूर्णी गति है।
• ओवन तापमान नियंत्रण: कई ओवन ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम के आधार पर काम करते हैं। इस मामले में हम वांछित तापमान सेट करते हैं और ओवन वास्तविक तापमान की निरंतर निगरानी किए बिना उस तापमान तक गर्म हो जाता है।
• वॉशिंग मशीन साइकिल चयन: जब हम कपड़ों के प्रकार के आधार पर वॉशिंग मशीन साइकिल चुनते हैं, तो मशीन पानी के तापमान या कपड़ों की स्थिति को लगातार मापे बिना एक पूर्वनिर्धारित कार्यक्रम का पालन करती है।

• इलेक्ट्रॉनिक उपकरणों के लिए रिमोट कंट्रोल: टीवी और अन्य इलेक्ट्रॉनिक उपकरणों के लिए रिमोट कंट्रोल डिवाइस द्वारा कमांड को सफलतापूर्वक निष्पादित किए जाने के बारे में फीडबैक प्राप्त किए बिना कमांड भेजते हैं।

Closed Loop Control System:

A closed loop control system, also known as a feedback control system, is a control mechanism that uses feedback to automatically control a system. It monitors the output and compares it with the desired result to minimize errors. This closed-loop nature helps achieve control over the output by ensuring deviations are corrected.
In simple terms, a closed loop control system continuously measures its output (feedback), compares it with the reference input, and adjusts itself to minimize any differences. This closed feedback loop is the defining characteristic that gives closed-loop systems to self-correct, adapt, and maintain stability despite disturbances - all without manual intervention. This system can automatically correct errors by comparing the actual output with the desired output, ensuring minimal deviation and enhancing system stability.

Examples: Automatic electric iron, missile launcher, speed control DC motor, etc.

Traffic lights control system is an example of control system. Here, a sequence of input signal is applied to this control system and the output is one of the three lights that will be on for some duration of time. During this time, the other two lights will be off. Based on the traffic study at a particular junction, the on and off times of the lights can be determined. Accordingly, the input signal controls the output. So, the traffic lights control system operates on time basis.
The error detector produces an error signal, which is the difference between the input and the feedback signal. This feedback signal is obtained from the block (feedback elements) by considering the output of the overall system as an input to this block. Instead of the direct input, the error signal is applied as an input to a controller. So, the controller produces an actuating signal which controls the plant. In this combination, the output of the control system is adjusted automatically till we get the desired response. Hence, the closed loop control systems are also called the automatic control systems. Traffic lights control system having sensor at the input is an example of a closed loop control system.
Closed-Loop Control System is used in applications where feedback and error handling are required. It is a complex system and not economical but optimization is possible. Maintenance of CLCS is difficult.

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली:

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली, जिसे फीडबैक नियंत्रण प्रणाली के रूप में भी जाना जाता है, एक नियंत्रण तंत्र है जो किसी सिस्टम को स्वचालित रूप से नियंत्रित करने के लिए फीडबैक का उपयोग करता है। यह आउटपुट की निगरानी करता है और त्रुटियों को कम करने के लिए

वांछित परिणाम के साथ इसकी तुलना करता है। यह बंद लूप प्रकृति विचलन को सही करके आउटपुट पर नियंत्रण प्राप्त करने में मदद करती है।

सरल शब्दों में, एक बंद लूप नियंत्रण प्रणाली लगातार अपने आउटपुट (फीडबैक) को मापती है, इसे संदर्भ इनपुट के साथ तुलना करती है, और किसी भी अंतर को कम करने के लिए खुद को समायोजित करती है। यह बंद फीडबैक लूप परिभाषित विशेषता है जो बंद लूप सिस्टम को गड़बड़ी के बावजूद खुद को सही करने, अनुकूलन करने और स्थिरता बनाए रखने की अनुमति देती है - सभी बिना किसी मैनुअल हस्तक्षेप के। यह प्रणाली वास्तविक आउटपुट की तुलना वांछित आउटपुट से करके त्रुटियों को स्वचालित रूप से ठीक कर सकती है, न्यूनतम विचलन सुनिश्चित करती है और सिस्टम स्थिरता को बढ़ाती है।

उदाहरण: स्वचालित इलेक्ट्रिक आयरन, मिसाइल लॉन्चर, स्पीड कंट्रोल डीसी मोटर, आदि।

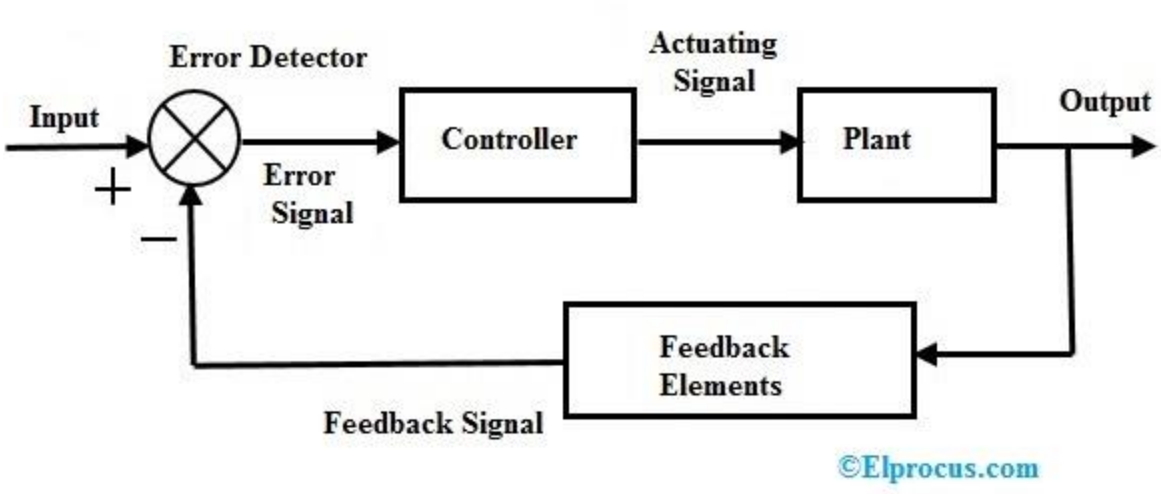
ट्रैफिक लाइट कंट्रोल सिस्टम कंट्रोल सिस्टम का एक उदाहरण है। यहाँ, इनपुट सिग्नल का एक क्रम इस कंट्रोल सिस्टम पर लागू होता है और आउटपुट तीन लाइटों में से एक है जो कुछ समय के लिए चालू रहेगी। इस दौरान, अन्य दो लाइटें बंद रहेंगी। किसी विशेष जंक्शन पर ट्रैफ़िक अध्ययन के आधार पर, लाइटों के चालू और बंद होने का समय निर्धारित किया जा सकता है। तदनुसार, इनपुट सिग्नल आउटपुट को नियंत्रित करता है। इसलिए, ट्रैफ़िक लाइट नियंत्रण प्रणाली समय के आधार पर काम करती है।

त्रुटि डिटेक्टर एक त्रुटि संकेत उत्पन्न करता है, जो इनपुट और फीडबैक सिग्नल के बीच का अंतर है। यह फीडबैक सिग्नल ब्लॉक (फीडबैक तत्वों) से समग्र सिस्टम के आउटपुट को इस ब्लॉक के इनपुट के रूप में मानकर प्राप्त किया जाता है। प्रत्यक्ष इनपुट के बजाय, त्रुटि संकेत को नियंत्रक के इनपुट के रूप में लागू किया जाता है। तो, नियंत्रक एक सक्रिय संकेत उत्पन्न करता है जो संयंत्र को नियंत्रित करता है। इस संयोजन में, नियंत्रण प्रणाली का आउटपुट स्वचालित रूप से तब तक समायोजित होता है जब तक हमें वांछित प्रतिक्रिया नहीं मिल जाती। इसलिए, बंद लूप नियंत्रण प्रणालियों को स्वचालित नियंत्रण प्रणाली भी कहा जाता है। इनपुट पर सेंसर वाला ट्रैफ़िक लाइट नियंत्रण प्रणाली एक बंद लूप नियंत्रण प्रणाली का एक उदाहरण है।

बंद-लूप नियंत्रण प्रणाली का उपयोग उन अनुप्रयोगों में किया जाता है जहाँ प्रतिक्रिया और त्रुटि प्रबंधन की आवश्यकता होती है। यह एक जटिल प्रणाली है और किफायती नहीं है लेकिन अनुकूलन संभव है। CLCS का रखरखाव मुश्किल है।

Block diagram of the closed-loop system:

The **block diagram of the closed-loop system** is shown below. The basic elements of the closed-loop control system include error detector, controller, feedback elements & power plant.

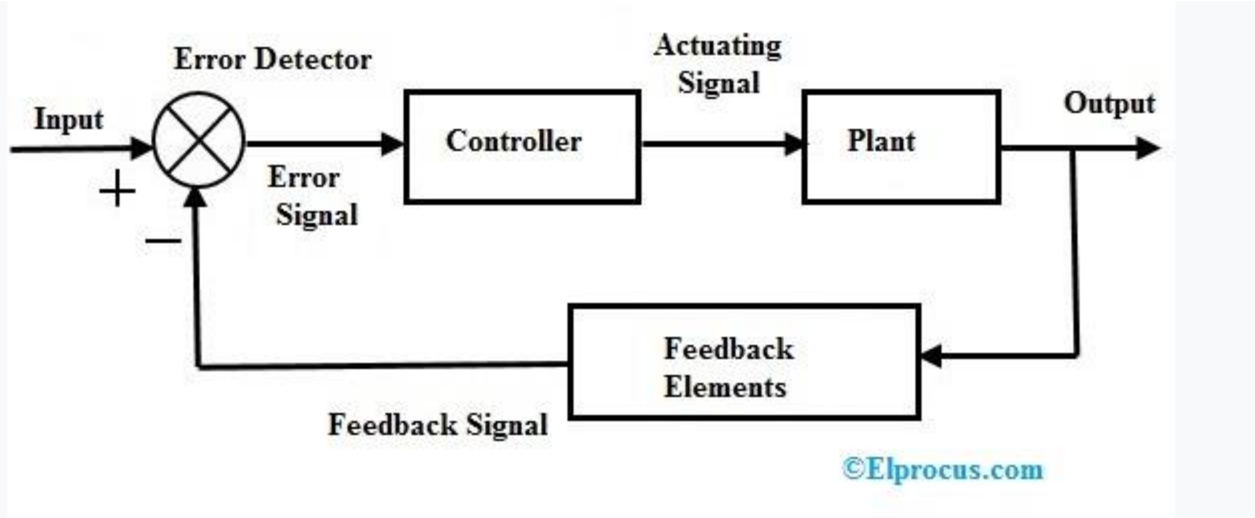


Components of Closed Loop Control System

- **Reference input:** Reference point is also known as setpoint. Input signal provided by the signal. This is the target output that the system is designed to follow.
- **Error Detector:** It compares the signal obtained from feedback and the reference input. The error detector is a crucial component in a closed-loop control system. Its primary function is to measure the difference between the desired or reference input (setpoint) and the actual output of the system, generating an error signal.
- **Controller:** It is the element which produces the desired output from the actuating signal. The controller is a crucial component that calculates the corrective action needed to minimize the error and bring the system output closer to the setpoint.
- **Process:** **T**he plant or process represents the system being controlled. It could be a physical system like a motor, chemical process, or any other dynamic system. It is the device to be controlled.
- **Controlled output:** It is the quantity which required to be controlled out the desired level. The controlled output is the parameter or variable that the control system aims to control and regulate.
- **Feedback :** It is the part of the output signal which fed to the error detector for comparison with reference input. This information is then compared to the reference input to determine the error, which is the difference between the desired and actual outputs.

बंद-लूप प्रणाली का ब्लॉक आरेख:

बंद-लूप प्रणाली का ब्लॉक आरेख नीचे दिखाया गया है। बंद-लूप नियंत्रण प्रणाली के मूल तत्वों में त्रुटि डिटेक्टर, नियंत्रक, फीडबैक तत्व और पावर प्लांट शामिल हैं



क्लोज्ड लूप कंट्रोल सिस्टम के घटक

• संदर्भ इनपुट: संदर्भ बिंदु को सेटपॉइंट के रूप में भी जाना जाता है। सिग्नल द्वारा प्रदान किया गया इनपुट सिग्नल। यह लक्ष्य आउटपुट है जिसे सिस्टम को फॉलो करने के लिए डिज़ाइन किया गया है।

• त्रुटि डिटेक्टर: यह फीडबैक और संदर्भ इनपुट से प्राप्त सिग्नल की तुलना करता है। त्रुटि डिटेक्टर एक बंद लूप नियंत्रण प्रणाली में एक महत्वपूर्ण घटक है। इसका प्राथमिक कार्य वांछित या संदर्भ इनपुट (सेटपॉइंट) और सिस्टम के वास्तविक आउटपुट के बीच अंतर को मापना है, जिससे त्रुटि सिग्नल उत्पन्न होता है।

• नियंत्रक: यह वह तत्व है जो सक्रिय सिग्नल से वांछित आउटपुट उत्पन्न करता है। नियंत्रक एक महत्वपूर्ण घटक है जो त्रुटि को कम करने और सिस्टम आउटपुट को सेटपॉइंट के करीब लाने के लिए आवश्यक सुधारात्मक कार्रवाई की गणना करता है।

• प्रक्रिया: संयंत्र या प्रक्रिया नियंत्रित की जा रही प्रणाली का प्रतिनिधित्व करती है। यह एक भौतिक प्रणाली जैसे मोटर, रासायनिक प्रक्रिया या कोई अन्य गतिशील प्रणाली हो सकती है। यह नियंत्रित किया जाने वाला उपकरण है।

• नियंत्रित आउटपुट: यह वह मात्रा है जिसे वांछित स्तर तक नियंत्रित करने की आवश्यकता होती है। नियंत्रित आउटपुट वह पैरामीटर या चर है जिसे नियंत्रण प्रणाली नियंत्रित और विनियमित करने का लक्ष्य रखती है।

• फीडबैक: यह आउटपुट सिग्नल का वह हिस्सा है जो संदर्भ इनपुट के साथ तुलना के लिए त्रुटि डिटेक्टर को खिलाया जाता है। फिर इस जानकारी की तुलना संदर्भ इनपुट से की जाती है ताकि त्रुटि का पता लगाया जा सके, जो वांछित और वास्तविक आउटपुट के बीच का अंतर है।

Working Operation Closed Loop Control System

The fundamental working principle of a closed loop control system revolves around feedback. Here's a step by step breakdown:

- **Set Point (Reference Input):** The desired value or condition that the system aims to achieve.
- **Sensor:** Measures the actual output of the system and sends this information back as feedback.
- **Comparator (Error Detector):** Compares the actual output with the set point and determines the error (difference).
- **Controller:** Processes the error signal and generates a control signal to adjust the system's input.
- **Actuator:** Converts the control signal into a physical action to influence the system's output.

The system continuously repeats these steps, thus maintaining the desired output by minimizing the error. The output of the system is sensed using sensors that provide feedback. This actual output is compared to the reference signal using an error detector which determines the difference or error signal. The error signal is processed by a controller which determines how to adjust the input to minimize this error. The controller output acts as a correction input to adjust the system and drive it toward achieving the desired output state. This closed feedback loop continues operating, constantly monitoring and correcting deviations to keep the output matching the reference precision.

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली का कार्य संचालन

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली का मूल कार्य सिद्धांत फीडबैक के इर्द-गिर्द घूमता है। यहाँ चरण दर चरण विवरण दिया गया है:

- सेट पॉइंट (संदर्भ इनपुट): वांछित मान या स्थिति जिसे सिस्टम प्राप्त करना चाहता है।
- सेंसर: सिस्टम के वास्तविक आउटपुट को मापता है और इस जानकारी को फीडबैक के रूप में वापस भेजता है।
- तुलनित्र (त्रुटि डिटेक्टर): सेट पॉइंट के साथ वास्तविक आउटपुट की तुलना करता है और त्रुटि (अंतर) निर्धारित करता है।
- नियंत्रक: त्रुटि संकेत को संसाधित करता है और सिस्टम के इनपुट को समायोजित करने के लिए एक नियंत्रण संकेत उत्पन्न करता है।
- एक्ट्यूएटर: सिस्टम के आउटपुट को प्रभावित करने के लिए नियंत्रण संकेत को एक भौतिक क्रिया में परिवर्तित करता है।

सिस्टम लगातार इन चरणों को दोहराता है, इस प्रकार त्रुटि को कम करके वांछित आउटपुट को बनाए रखता है। सिस्टम के आउटपुट को फीडबैक प्रदान करने वाले सेंसर का उपयोग करके महसूस किया जाता है। इस वास्तविक आउटपुट की तुलना त्रुटि डिटेक्टर का उपयोग करके संदर्भ सिग्नल से की जाती है जो अंतर या त्रुटि सिग्नल निर्धारित करता है। त्रुटि सिग्नल को एक नियंत्रक द्वारा संसाधित किया जाता है जो यह निर्धारित करता है कि इस त्रुटि को कम करने के लिए इनपुट को कैसे समायोजित किया जाए। नियंत्रक आउटपुट सिस्टम को समायोजित करने और वांछित आउटपुट स्थिति प्राप्त करने की दिशा में इसे चलाने के लिए एक सुधार इनपुट के रूप में कार्य करता है। यह बंद फीडबैक लूप निरंतर संचालन करता रहता है, आउटपुट को संदर्भ परिशुद्धता से मेल खाने के लिए विचलन की निरंतर निगरानी और सुधार करता रहता है।

Types of Closed Loop Control System:

Closed-loop control systems are classified into two types depending on the feedback signal nature such as positive feedback signal and the negative feedback signal.

Positive Feedback Signal:

The closed-loop system including a positive feedback signal can be connected to the input of the system is known as a positive feedback system. This system is also named as regenerative feedback. The best example of this positive feedback in electronic circuits is an operational amplifier. Because this loop can be achieved by connecting some portion of the output voltage to the input of the non-inverting terminal through a feedback loop using a resistor.

Negative Feedback Signal:

The closed-loop system including a negative feedback signal can be connected to the input of the system is named as a negative feedback system. This kind of system is also named as degenerative feedback. These types of systems are very stable and also enhance strength.

These systems are used to control the electronic machines like current generators, voltage generators, and also control the machinery speed. The closed-loop control systems are used for the below-stated requirements.

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली के प्रकार:

बंद-लूप नियंत्रण प्रणालियों को फीडबैक सिग्नल प्रकृति के आधार पर दो प्रकारों में वर्गीकृत किया जाता है जैसे सकारात्मक फीडबैक सिग्नल और नकारात्मक फीडबैक सिग्नल।

सकारात्मक प्रतिक्रिया संकेत:

सकारात्मक प्रतिक्रिया संकेत सहित बंद लूप प्रणाली को सिस्टम के इनपुट से जोड़ा जा सकता है जिसे सकारात्मक प्रतिक्रिया प्रणाली के रूप में जाना जाता है। इस प्रणाली को पुनर्योजी प्रतिक्रिया भी कहा जाता है। इलेक्ट्रॉनिक सर्किट में इस सकारात्मक प्रतिक्रिया का सबसे अच्छा उदाहरण एक ऑपरेशनल एम्पलीफायर है। क्योंकि इस लूप को एक प्रतिरोधक का उपयोग करके फीडबैक लूप के माध्यम से आउटपुट वोल्टेज के कुछ हिस्से को नॉन-इनवर्टिंग टर्मिनल के इनपुट से जोड़कर प्राप्त किया जा सकता है।

नकारात्मक प्रतिक्रिया संकेत:

नकारात्मक प्रतिक्रिया संकेत सहित बंद-लूप प्रणाली को सिस्टम के इनपुट से जोड़ा जा सकता है जिसे नकारात्मक प्रतिक्रिया प्रणाली कहा जाता है। इस तरह की प्रणाली को अपक्षयी प्रतिक्रिया भी कहा जाता है। इस तरह की प्रणालियाँ बहुत स्थिर होती हैं और ताकत भी बढ़ाती हैं।
इन प्रणालियों का उपयोग इलेक्ट्रॉनिक मशीनों जैसे करंट जनरेटर, वोल्टेज जनरेटर को नियंत्रित करने और मशीनरी की गति को नियंत्रित करने के लिए किया जाता है। बंद-लूप नियंत्रण प्रणाली का उपयोग नीचे बताई गई आवश्यकताओं के लिए किया जाता है।

Applications of Closed Loop Control System

Some major application areas demonstrating the widespread prevalence of closed loop control systems include:

- **Industrial Processes:** Temperature/pressure control in boilers, level control in tanks, speed control in motors.
- **Automobiles:** Engine idle speed control, anti-lock braking, stability control, cruise control, automatic transmission.
- **Robotics:** Position control, coordinated multi-axis motion, force/torque feedback.
- **Aircraft Systems:** Autopilot, engine/flight control, navigation/guidance systems.
- **Household Appliances:** refrigerator temperature regulation, washing machine programs, heating/cooling systems.
- **Medical Equipment:** ventilators, infusion pumps, monitoring instruments, prosthetics.
- **3D Printers:** Layer-by-layer precision for extruder movements and temperature regulation.
- **Power Systems:** Generator voltage/frequency regulation, automatic generation control.

The examples show how closed loop techniques have enabled a new era of automation across industries.

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली के अनुप्रयोग:

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली के व्यापक प्रचलन को प्रदर्शित करने वाले कुछ प्रमुख अनुप्रयोग क्षेत्रों में शामिल हैं:

- औद्योगिक प्रक्रियाएँ: बॉयलर में तापमान/दबाव नियंत्रण, टैंकों में स्तर नियंत्रण, मोटरों में गति नियंत्रण।
- ऑटोमोबाइल: इंजन निष्क्रिय गति नियंत्रण, एंटी-लॉक ब्रेकिंग, स्थिरता नियंत्रण, क्रूज नियंत्रण, स्वचालित ट्रांसमिशन।
- रोबोटिक्स: स्थिति नियंत्रण, समन्वित बहु-अक्ष गति, बल/टोक़ प्रतिक्रिया।
- विमान प्रणाली: ऑटोपायलट, इंजन/उड़ान नियंत्रण, नेविगेशन/मार्गदर्शन प्रणाली।
- घरेलू उपकरण: रेफ्रिजरेटर तापमान विनियमन, वॉशिंग मशीन प्रोग्राम, हीटिंग/कूलिंग सिस्टम।
- चिकित्सा उपकरण: वेंटिलेटर, इन्फ्यूजन पंप, निगरानी उपकरण, प्रोस्थेटिक्स।
- 3D प्रिंटर: एक्सट्रूडर आंदोलनों और तापमान विनियमन के लिए परत-दर-परत परिशुद्धता।
- पावर सिस्टम: जनरेटर वोल्टेज/आवृत्ति विनियमन, स्वचालित उत्पादन नियंत्रण।
- उदाहरण दिखाते हैं कि कैसे बंद लूप तकनीकों ने उद्योगों में स्वचालन के एक नए युग को सक्षम किया है।

Advantages of Closed Loop Control System

Some key advantages offered by closed loop control systems include:

- **Increased accuracy:** Feedback ensures rapid error correction, allowing extremely precise output regulation.
- **Improved stability:** Negative feedback inherently counteracts external disturbances, making the system less sensitive.
- **Wide input-output relation:** Due to feedback amplification, the system can operate over a wider range of input-output conditions.
- **Self-regulating operation:** Feedback loops maintain automatic control without requiring human supervision after initial setup.
- **Adaptability to parameter variations:** Closed loop designs can compensate for component tolerances and drifts and continue functioning optimally.
- **Ease of design and analysis:** Standard mathematical models simplify controller design procedures compared to open loop systems.
- **Applicability in complex processes:** Cascaded closed loops are well-suited for controlling multi-variable plant dynamics seen in modern automation.

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली के लाभ:

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली द्वारा प्रदान किए जाने वाले कुछ प्रमुख लाभों में शामिल हैं:

- बढ़ी हुई सटीकता: फीडबैक तेजी से त्रुटि सुधार सुनिश्चित करता है, जिससे अत्यंत सटीक आउटपुट विनियमन की अनुमति मिलती है।
- बेहतर स्थिरता: नकारात्मक फीडबैक स्वाभाविक रूप से बाहरी गड़बड़ी का प्रतिकार करता है, जिससे सिस्टम कम संवेदनशील हो जाता है।
- व्यापक इनपुट-आउटपुट संबंध: फीडबैक प्रवर्धन के कारण, सिस्टम इनपुट-आउटपुट स्थितियों की एक विस्तृत श्रृंखला पर काम कर सकता है।
- स्व-विनियमन संचालन: फीडबैक लूप प्रारंभिक सेटअप के बाद मानव पर्यवेक्षण की आवश्यकता के बिना स्वचालित नियंत्रण बनाए रखते हैं।
- पैरामीटर भिन्नताओं के लिए अनुकूलनशीलता: बंद लूप डिज़ाइन घटक सहनशीलता और बहाव के लिए क्षतिपूर्ति कर सकते हैं और इष्टतम रूप से कार्य करना जारी रख सकते हैं।
- डिजाइन और विश्लेषण में आसानी: मानक गणितीय मॉडल ओपन लूप सिस्टम की तुलना में नियंत्रक डिजाइन प्रक्रियाओं को सरल बनाते हैं।
- जटिल प्रक्रियाओं में प्रयोज्यता: कैस्केड किए गए बंद लूप आधुनिक स्वचालन में देखे जाने वाले बहु-चर संयंत्र गतिशीलता को नियंत्रित करने के लिए उपयुक्त हैं।

Disadvantages of Closed Loop Control System

Despite its benefits, closed loop control systems have some disadvantages:

- **Complexity:** More complex design and implementation compared to open loop systems.
- **Cost:** Higher cost due to additional components like sensors and controllers.
- **Maintenance:** Increased maintenance requirements to ensure reliable operation.
- The control system oscillates sometimes due to feedback signals.
- Less stable operation than that of open-loop control system.
- More efforts, as well as time, are required while designing the system

बंद लूप नियंत्रण प्रणाली के नुकसान:

- इसके लाभों के बावजूद, बंद लूप नियंत्रण प्रणाली में कुछ नुकसान हैं:
- जटिलता: ओपन लूप सिस्टम की तुलना में अधिक जटिल डिजाइन और कार्यान्वयन।
- लागत: सेंसर और नियंत्रक जैसे अतिरिक्त घटकों के कारण उच्च लागत।

- रखरखाव: विश्वसनीय संचालन सुनिश्चित करने के लिए रखरखाव की बढ़ी हुई आवश्यकताएँ।
- फीडबैक सिग्नल के कारण नियंत्रण प्रणाली कभी-कभी दोलन करती है।
- ओपन-लूप नियंत्रण प्रणाली की तुलना में कम स्थिर संचालन।
- सिस्टम को डिज़ाइन करते समय अधिक प्रयासों के साथ-साथ समय की भी आवश्यकता होती है

Multi-Variable Control System

A **multi-variable control system** (also called a **multi-input multi-output (MIMO) system**) is a type of control system that has **multiple inputs and multiple outputs**. Unlike single-variable control systems (SISO - Single Input Single Output), these systems involve interactions between multiple variables, making them more complex to analyze and control.

Key Features of Multi-Variable Control Systems:

1. **Multiple Inputs and Outputs (MIMO)** – More than one input affects multiple outputs.
2. **Interdependency** – A change in one variable can affect multiple outputs.
3. **Feedback Mechanism** – Uses feedback from multiple sensors to regulate various outputs.
4. **Coupling Effect** – Inputs interact with each other, requiring advanced control strategies.

Block Diagram of a Multi-Variable Control System

Input 1 → Controller 1 → Process 1 → Output 1
Input 2 → Controller 2 → Process 2 → Output 2

However, in a multi-variable system, the outputs may be interconnected, meaning that:

- **Input 1 can affect Output 2**
- **Input 2 can affect Output 1**

Thus, a more realistic diagram would look like this:

Input 1 → Controller 1 → Process 1 → Output 1
↘ ↗
Input 2 → Controller 2 → Process 2 → Output 2

Here, **cross-coupling effects** occur, meaning that adjusting one variable may impact another.

Comparison: Multi-Variable vs. Single-Variable Control Systems

Feature	**Single-Variable Control System (SISO)**	**Multi-Variable Control System (MIMO)**
Number of Inputs & Outputs	One input, one output	Multiple inputs, multiple outputs
Interaction Between Variables	No interaction	Strong interaction between variables
Complexity	Simple design and analysis	More complex due to interdependencies
Control Method	PID, simple feedback control	Advanced control methods (MPC, Decoupling)
Examples	Home thermostat, simple DC motor control	Aircraft control, chemical process control

Applications of Multi-Variable Control Systems

Multi-variable control systems are widely used in industries where multiple inputs and outputs must be controlled simultaneously.

1. Aerospace and Automotive

- **Aircraft flight control systems** (altitude, speed, direction)
- **Autonomous vehicles** (steering, braking, acceleration)
- **Suspension control in modern cars** (adjusts damping and stiffness)

2. Industrial Process Control

- **Chemical plants** (distillation column control)
- **Oil refineries** (temperature, pressure, and flow rate regulation)
- **Power plants** (boiler control, steam turbine regulation)

3. Robotics and Automation

- **Robotic arms** (multiple joints controlling position and force)
- **Manufacturing systems** (conveyor belts, robotic assembly lines)

4. Electrical and Electronics Systems

- **Power grid control** (voltage, frequency, power distribution)
- **Multi-machine systems in factories** (synchronized operations)

5. Medical Systems

- **Ventilators** (controlling oxygen level, pressure, and airflow)
- **MRI and CT scan machines** (coordinating multiple magnetic field adjustments)

Advantages of Multi-Variable Control Systems

✅ **Better Performance and Accuracy**

- Simultaneously manages multiple outputs efficiently.
- More precise control compared to single-variable systems.

✅ **Optimized Resource Utilization**

- Helps in **energy savings** (e.g., power plants, HVAC systems).
- Reduces **material waste** in industrial processes.

✅ **Handles Complex Systems with Interactions**

- Essential for **aerospace, chemical, and power plants** where multiple variables interact.
- Can predict and adjust for system disturbances.

✅ **Automation and Efficiency**

- Enables **fully automated systems** (e.g., autonomous cars, smart grids).
- Reduces the need for manual adjustments.

✅ **Improved Stability and Reliability**

- Advanced control strategies help maintain system stability.
- More robust against **external disturbances** and errors.

मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम (Multi-Variable Control System)

परिचय (Introduction)

मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम (MIMO - Multi-Input Multi-Output System) एक ऐसा नियंत्रण तंत्र है जिसमें **एक से अधिक इनपुट और आउटपुट होते हैं**। यह सिस्टम जटिल और आपस में जुड़े कई चर (Variables) को नियंत्रित करता है, जहाँ एक इनपुट कई आउटपुट को प्रभावित कर सकता है।

मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम के घटक (Components of Multi-Variable Control System)

1. **इनपुट वेरिएबल (Input Variables)** - वे संकेत (Signals) जो सिस्टम में प्रवेश करते हैं और नियंत्रण की आवश्यकता होती है।
2. **नियंत्रक (Controller)** - सिस्टम के आउटपुट को नियंत्रित करने के लिए आवश्यक गणना और निर्णय लेने वाली इकाई।
3. **प्रक्रिया (Process/Plant)** - वह सिस्टम जिसमें नियंत्रण लागू किया जाता है, जैसे कि रोबोटिक आर्म या विमान का उड़ान नियंत्रण।
4. **आउटपुट वेरिएबल (Output Variables)** - वे संकेत जो नियंत्रित परिणाम का प्रतिनिधित्व करते हैं।
5. **फीडबैक मैकेनिज्म (Feedback Mechanism)** - सिस्टम के आउटपुट की जानकारी नियंत्रक को वापस भेजने वाला भाग।

मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम का ब्लॉक डायग्राम

इनपुट 1 → नियंत्रक 1 → प्रक्रिया 1 → आउटपुट 1
↘ ↗
इनपुट 2 → नियंत्रक 2 → प्रक्रिया 2 → आउटपुट 2

यहाँ, **क्रॉस-कपलिंग इफेक्ट (Cross-Coupling Effect)** देखने को मिलता है, जिससे एक इनपुट कई आउटपुट को प्रभावित कर सकता है।

मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम: तुलना, अनुप्रयोग और लाभ

---

1. मल्टी-वेरिएबल और सिंगल-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम की तुलना

विशेषता	सिंगल-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम (SISO)	मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम (MIMO)
इनपुट और आउटपुट की	एक इनपुट, एक आउटपुट	कई इनपुट, कई आउटपुट

संख्या		
चर (Variables) के बीच परस्पर क्रिया	कोई परस्पर प्रभाव नहीं	एक इनपुट कई आउटपुट को प्रभावित कर सकता है
जटिलता	सरल डिजाइन और विश्लेषण	अधिक जटिलता और गणितीय मॉडलिंग की आवश्यकता
नियंत्रण विधि	PID, साधारण फीडबैक नियंत्रण	उन्नत नियंत्रण विधियाँ (MPC, Decoupling)
उदाहरण	होम थर्मोस्टेट, सिंपल डीसी मोटर कंट्रोल	विमान नियंत्रण, केमिकल प्रोसेस कंट्रोल

---

2. मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम के अनुप्रयोग (Applications)

1. एयरोस्पेस और ऑटोमोबाइल उद्योग

🚀 **विमान नियंत्रण प्रणाली** - ऊंचाई, गति और दिशा का नियंत्रण।
🚗 **स्वायत्त वाहन (Autonomous Vehicles)** - ब्रेकिंग, स्टीयरिंग और गति नियंत्रण।
🚙 **सस्पेंशन सिस्टम** - गाड़ियों में झटकों को कम करने के लिए सस्पेंशन नियंत्रण।

2. औद्योगिक प्रक्रिया नियंत्रण (Industrial Process Control)

🏭 **रासायनिक संयंत्र (Chemical Plant)** - तापमान, दबाव और प्रवाह दर का नियंत्रण।
⛽ **तेल रिफाइनरी (Oil Refinery)** - डिस्टिलेशन टॉवर में विभिन्न कारकों का नियंत्रण।
⚡ **पावर प्लांट** - बॉयलर, टरबाइन और वोल्टेज नियंत्रण।

3. रोबोटिक्स और स्वचालन (Robotics & Automation)

🤖 **रोबोटिक आर्म** - कई जोड़ (joints) और मूवमेंट का नियंत्रण।
🏭 **मैन्युफैक्चरिंग प्लांट** - असेंबली लाइन और मशीनों का समन्वय।

4. इलेक्ट्रिकल और इलेक्ट्रॉनिक्स सिस्टम

🔌 **पावर ग्रिड नियंत्रण** - वोल्टेज, फ्रीक्वेंसी और लोड बैलेंसिंग।
🏠 **स्मार्ट होम सिस्टम** - लाइट, तापमान, सुरक्षा का समन्वय।

5. मेडिकल सिस्टम

🏥 **वेंटिलेटर नियंत्रण** - ऑक्सीजन प्रवाह, दबाव और श्वसन दर का समायोजन।
🧲 **MRI और CT स्कैन मशीन** - विभिन्न चुंबकीय क्षेत्रों और स्कैनिंग प्रक्रिया का नियंत्रण।

---

3. मल्टी-वेरिएबल कंट्रोल सिस्टम के लाभ (Advantages)

✅ **बेहतर प्रदर्शन और सटीकता**

- कई चर (Variables) को एक साथ प्रभावी रूप से नियंत्रित करता है।
- अधिक सटीक नियंत्रण प्रदान करता है।

✅ **संसाधनों का अनुकूलन (Optimization of Resources)**

- **ऊर्जा की बचत** में मदद करता है (जैसे पावर प्लांट और HVAC सिस्टम)।
- औद्योगिक प्रक्रियाओं में **कच्चे माल की बर्बादी कम करता है**।

✅ **कठिन प्रणालियों का प्रभावी नियंत्रण**

- जटिल प्रणालियों (जैसे हवाई जहाज, रासायनिक संयंत्र) के लिए आवश्यक।
- बाहरी व्यवधानों (Disturbances) को प्रभावी ढंग से संभालता है।

✅ **स्वचालन और उच्च दक्षता (Automation & Efficiency)**

- **पूरी तरह से स्वचालित प्रणाली** को सक्षम बनाता है (जैसे, रोबोटिक्स और स्मार्ट ग्रिड)।
- मैन्युअल समायोजन की आवश्यकता को कम करता है।

✅ **बेहतर स्थिरता और विश्वसनीयता**

- उन्नत नियंत्रण रणनीतियाँ प्रणाली को स्थिर बनाए रखती हैं।
- **बाहरी व्यवधानों** और **त्रुटियों** से अधिक सुरक्षित।

Time Response of Feedback Control System

Introduction

The **time response** of a feedback control system refers to how the system's output behaves over time after applying an input. It helps in understanding the system's stability, speed, and accuracy.

The time response consists of two main components:

1. **Transient Response** – The initial response before the system settles to a steady-state.
2. **Steady-State Response** – The long-term behavior of the system after transients have died out.

1. Components of Time Response

The total response of a system can be written as:

$$c(t) = c_t(t) + c_s(t)$$

Where:

- $c(t)$ = Total response
- $c_t(t)$ = Transient response
- $c_s(t)$ = Steady-state response

(A) Transient Response

- The part of the response that exists **before the system reaches a steady-state**.
- It includes **natural response** due to system dynamics.
- Determines **speed and stability** of the system.

(B) Steady-State Response

- The response that remains after **transient effects** have disappeared.
- Determines the system's **accuracy** in following the input.

Standard Test Signals in Control Systems

In control system analysis, **standard test signals** are used to evaluate system performance, stability, and transient response. These signals help in determining system characteristics like **rise time, settling time, overshoot, and steady-state error**.

Types of Standard Test Signals

Signal Type	Mathematical Expression	Laplace Transform
Impulse Input	$\delta(t)$	1
Step Input	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
Ramp Input	$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$
Parabolic Input	$\frac{t^2}{2}u(t)$	$\frac{1}{s^3}$
Sinusoidal Input	$A\sin(\omega t)$	$\frac{A\omega}{s^2+\omega^2}$

---

1. Unit Impulse Signal (δ (t))

Definition:

A **unit impulse function** (also called Dirac delta function) is an idealized function that has an **infinitely high peak at t=0 and zero elsewhere**, with an **area of 1**.

$$\delta(t) = \begin{matrix} \infty, t = 0 \\ 0, t \neq 0 \end{matrix}$$

- **Laplace Transform:** L[δ(t)]=1
- **Use in Control Systems:**
    - Models sudden shocks or disturbances in the system.
    - Used to find **impulse response**, which helps in system characterization.

---

2. Unit Step Signal (u(t))

Definition:

A **unit step function** is defined as

$$u(t) = \begin{matrix} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{matrix}$$

Laplace Transform:

$$L[u(t)] = \frac{1}{s}$$

- **Use in Control Systems:**
    - Used to analyze **step response**, which represents system reaction to sudden changes.
    - Helps in measuring **rise time, overshoot, and settling time**.

---

3. Unit Ramp Signal ($\mathrm{tu(t)}$)

Definition:

A **unit ramp function** increases linearly with time.

$$\mathrm{r(t) = tu(t)}$$

- **Laplace Transform:** $\mathrm{L[r(t)]} = \frac{1}{s^2}$
- **Use in Control Systems:**
    - Represents a **linearly increasing input**, such as a moving target.
    - Helps in evaluating **velocity error constant** $(\boldsymbol{k_v})$and steady-state error.

---

4. Unit Parabolic Signal ($\boldsymbol{\frac{t^2}{2}u(t)}$)

Definition:

A **parabolic function** increases quadratically with time.

$$p(t) = \frac{t^2}{2}u(t)$$

- **Laplace Transform:** $\mathrm{L[p(t)]} = \frac{1}{s^3}$
- **Use in Control Systems:**
    - Models **acceleration-based inputs** (e.g., robotic motion, vehicle acceleration).
    - Helps in evaluating **acceleration error constant** $(\boldsymbol{k_a})$

फीडबैक नियंत्रण प्रणाली की समय प्रतिक्रिया (Time Response of Feedback Control System)

परिचय (Introduction):

समय प्रतिक्रिया का तात्पर्य किसी नियंत्रण प्रणाली (Control System) की आउटपुट प्रतिक्रिया से होता है जब उसे कोई इनपुट दिया जाता है। यह प्रतिक्रिया **स्थायित्व (stability), गति (speed), और सटीकता (accuracy)** को समझने में मदद करती है।

समय प्रतिक्रिया के दो मुख्य घटक होते हैं:

1. **क्षणिक प्रतिक्रिया (Transient Response)** - प्रारंभिक प्रतिक्रिया जो तब तक रहती है जब तक प्रणाली स्थिर अवस्था तक नहीं पहुँचती।
2. **स्थिर अवस्था प्रतिक्रिया (Steady-State Response)** - दीर्घकालिक प्रतिक्रिया जो तब होती है जब क्षणिक प्रभाव समाप्त हो जाते हैं।

---

1. समय प्रतिक्रिया के घटक (Components of Time Response)

किसी प्रणाली की कुल प्रतिक्रिया को इस प्रकार लिखा जाता है:

$$c(t) = c_t(t) + c_s(t)$$

जहाँ:

- $c(t)$= कुल प्रतिक्रिया (Total Response)
- $c_t(t)$ = क्षणिक प्रतिक्रिया (Transient Response)
- $c_s(t)$ = स्थिर अवस्था प्रतिक्रिया (Steady-State Response)

(A) क्षणिक प्रतिक्रिया (Transient Response)

- यह प्रतिक्रिया तब तक रहती है जब तक प्रणाली अपनी स्थिर अवस्था तक नहीं पहुँचती।
- इसमें प्रणाली की **प्राकृतिक प्रतिक्रिया (natural response)** शामिल होती है।
- यह **गति (speed) और स्थायित्व (stability)** को निर्धारित करती है।

(B) स्थिर अवस्था प्रतिक्रिया (Steady-State Response)

- यह प्रतिक्रिया तब होती है जब प्रणाली संतुलित हो जाती है।
- यह **सटीकता (accuracy)** को निर्धारित करती है।

नियंत्रण प्रणाली में मानक परीक्षण संकेत (Standard Test Signals in Control System in Hindi):

नियंत्रण प्रणाली में, **मानक परीक्षण संकेत** (Standard Test Signals) का उपयोग **प्रणाली की प्रतिक्रिया, स्थिरता, और प्रदर्शन** का विश्लेषण करने के लिए किया जाता है। ये संकेत सिस्टम की **क्षणिक (Transient) और स्थिर अवस्था (Steady-State) प्रतिक्रिया** को समझने में मदद करते हैं।

मानक परीक्षण संकेतों के प्रकार (Types of Standard Test Signals)

संकेत का प्रकार	गणितीय व्यंजक (Mathematical Expression)	लैप्लास रूपांतरण (Laplace Transform)
इम्पल्स संकेत (Impulse Signal)	$\delta(t)$	1
स्टेप संकेत (Step Signal)	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
रैम्प संकेत (Ramp Signal)	$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$
पैराबोलिक संकेत (Parabolic Signal)	$\frac{t^2}{2}u(t)$	$\frac{1}{s^3}$
साइनुसॉइडल संकेत (Sinusoidal Signal)	$A\sin(\omega t)$	$\frac{A\omega}{s^2+\omega^2}$

1. यूनिट इम्पल्स संकेत (Unit Impulse Signal (δ (t))

परिभाषा:

यूनिट इम्पल्स संकेत (Dirac Delta Function) एक **आदर्श संकेत** है, जिसकी **अवधि शून्य होती है लेकिन परिमाण (Magnitude) अनंत** होता है, और इसका क्षेत्रफल 1 होता है।

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, t = 0 \\ 0, t \neq 0 \end{cases}$$

- **लैप्लास रूपांतरण:** $L[\delta(t)]=1$
- **उपयोग:**
  - किसी प्रणाली की **आवेग प्रतिक्रिया (Impulse Response)** ज्ञात करने में।
  - सिस्टम पर एक **अचानक झटका (Sudden Shock)** लागू करने के लिए।

---

2. यूनिट स्टेप संकेत (Unit Step Signal - u(t))

परिभाषा:

यूनिट स्टेप संकेत अचानक **शून्य से 1** पर कूदता है और उसके बाद स्थिर रहता है।

$$u(t)= \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t<0 \end{cases}$$

- **लैप्लास रूपांतरण:**

$$L[u(t)] = \frac{1}{s}$$

- **उपयोग:**
  - सिस्टम की **स्टेप प्रतिक्रिया** विश्लेषण करने के लिए।
  - किसी **अचानक परिवर्तन** का अध्ययन करने के लिए।

---

3. यूनिट रैम्प संकेत (Unit Ramp Signal - tu(t))

परिभाषा:

यूनिट रैम्प संकेत समय के साथ **रेखीय रूप से बढ़ता है।**

$$r(t) = tu(t)$$

- **लैप्लास रूपांतरण: :** $L[r(t)] = \frac{1}{s^2}$
- **उपयोग:**
  - निरंतर **गति (Velocity) से बढ़ने वाले इनपुट** को मॉडल करने के लिए।
  - **वेग त्रुटि स्थिरांक (Velocity Error Constant -** (k_v)**)** निकालने के लिए।

---

4. यूनिट पैराबोलिक संकेत (Unit Parabolic Signal - ($\frac{t^2}{2}u(t)$))

परिभाषा:

यूनिट पैराबोलिक संकेत समय के वर्ग (Square of Time) के समानुपाती होता है।

$$p(t) = \frac{t^2}{2}u(t)$$

- **लैप्लास रूपांतरण:** $L[p(t)] = \frac{1}{s^3}$
- **उपयोग:**
  - **त्वरण (Acceleration) आधारित प्रणाली** का विश्लेषण करने के लिए।
  - **त्वरण त्रुटि स्थिरांक (Acceleration Error Constant -** (k_a)**)** निकालने के लिए।

Process Control and Its Benefits

What is Process Control?

Process control refers to the use of technology, instruments, and systems to **monitor, regulate, and optimize** industrial processes. It ensures that processes operate efficiently, safely, and within desired limits by maintaining variables like **temperature, pressure, flow rate, level, and composition** at set values.

Process control is widely used in industries such as **chemical, pharmaceutical, food processing, power plants, and manufacturing** to improve **quality, productivity, and safety**.

Types of Process Control

1. **Open-Loop Control System**
   - No feedback mechanism.
   - The controller sends input without considering the output.
   - Example: **A washing machine**, which runs for a fixed time without sensing if clothes are clean.
2. **Closed-Loop Control System**
   - Uses feedback to compare the actual output with the desired setpoint.
   - Adjusts process parameters automatically to minimize deviations.
   - Example: **Air conditioners** that adjust cooling based on room temperature.
3. **Discrete Control System**
   - Operates in a step-wise manner and is event-driven.
   - Common in automation like **robotic assembly lines**.
4. **Continuous Control System**
   - Controls variables that change continuously over time.
   - Used in industries like **oil refining and power plants**.
5. **Batch Control System**
   - Controls processes that occur in batches rather than continuously.
   - Example: **Pharmaceutical and food industries**.

Benefits of Process Control

1. Improved Product Quality

- Maintains **consistent output** by reducing variations.
- Ensures adherence to **industry standards and regulations**.

2. Increased Efficiency and Productivity

- Optimizes resource usage, reducing **waste and energy consumption**.
- Minimizes **human intervention**, improving efficiency.

3. Enhanced Safety

- Prevents hazardous conditions by **monitoring and controlling** variables.
- Reduces risks in industries like **chemical plants and nuclear power stations**.

4. Cost Savings

- Reduces **material wastage and energy costs**.
- Minimizes downtime by **detecting faults early**.

5. Faster Response to Changes

- Automatically **adjusts process parameters** in real time.
- Handles **disturbances efficiently** without manual intervention.

6. Compliance with Regulations

- Ensures processes meet **legal and environmental standards**.
- Helps industries avoid **fines and legal issues**.

7. Remote Monitoring and Control

- Modern systems allow monitoring and control from **remote locations**.
- Example: **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** systems in power grids.

Applications of Process Control

1. Chemical and Petrochemical Industry

- Controlling **temperature, pressure, and flow** in chemical reactions.
- Example: **Oil refineries, gas processing plants**.

2. Power Plants

- Regulating **steam pressure, fuel flow, and generator output**.
- Example: **Thermal, nuclear, and hydroelectric plants**.

3. Food and Beverage Industry

- Maintaining **temperature, mixing ratios, and sterilization**.
- Example: **Dairy processing, brewing, and packaging**.

4. Pharmaceutical Industry

- Ensuring precise **drug formulation and sterilization**.
- Example: **Vaccine production, tablet manufacturing**.

5. Water Treatment Plants

- Controlling **pH levels, filtration, and chemical dosing**.
- Example: **Drinking water purification, wastewater treatment**.

6. Automotive and Manufacturing Industry

- Automating **assembly lines, welding, and painting**.
- Example: **Robotic arms in car manufacturing**.

प्रक्रिया नियंत्रण (Process Control) और इसके लाभ

प्रक्रिया नियंत्रण क्या है? (What is Process Control?)

प्रक्रिया नियंत्रण (Process Control) एक ऐसी तकनीक है जो **औद्योगिक प्रक्रियाओं की निगरानी, विनियमन और अनुकूलन** (monitor, regulate, and optimize) करने के लिए उपयोग की जाती है। इसका मुख्य उद्देश्य यह सुनिश्चित करना है कि कोई भी प्रक्रिया **सुरक्षित, कुशल और मानक सीमाओं के भीतर** संचालित हो।

यह प्रणाली विभिन्न **परिवर्तनीय तत्वों** जैसे **तापमान (Temperature), दाब (Pressure), प्रवाह दर (Flow Rate), स्तर (Level) और संरचना (Composition)** को नियंत्रित करने में मदद करती है।

उद्योगों में उपयोग:

रासायनिक (Chemical), औषधीय (Pharmaceutical), खाद्य प्रसंस्करण (Food Processing), ऊर्जा संयंत्र (Power Plants), और विनिर्माण (Manufacturing) उद्योगों में व्यापक रूप से उपयोग किया जाता है।

प्रक्रिया नियंत्रण के प्रकार (Types of Process Control)

1. ओपन-लूप नियंत्रण प्रणाली (Open-Loop Control System)

- इसमें **कोई फीडबैक नहीं** होता है।
- नियंत्रक (Controller) इनपुट भेजता है, लेकिन आउटपुट की जांच नहीं करता।
- **उदाहरण: वाशिंग मशीन**, जो निर्धारित समय तक चलती है, भले ही कपड़े साफ हों या नहीं।

2. क्लोज़-लूप नियंत्रण प्रणाली (Closed-Loop Control System)

- **फीडबैक तंत्र** (Feedback Mechanism) का उपयोग करता है।
- वास्तविक आउटपुट को वांछित मान (Setpoint) से तुलना करता है और आवश्यक समायोजन करता है।

- **उदाहरण: एयर कंडीशनर**, जो कमरे के तापमान के आधार पर समायोजित होता है।

3. डिस्क्रीट नियंत्रण प्रणाली (Discrete Control System)

- यह चरणबद्ध (Step-wise) तरीके से काम करता है और किसी विशेष घटना पर आधारित होता है।
- **उदाहरण: रोबोटिक असेंबली लाइन।**

4. सतत नियंत्रण प्रणाली (Continuous Control System)

- ऐसी प्रणाली जो समय के साथ **लगातार परिवर्तनशील** होती है।
- **उदाहरण: तेल रिफाइनरी (Oil Refinery) और विद्युत संयंत्र (Power Plants)।**

5. बैच नियंत्रण प्रणाली (Batch Control System)

- यह प्रक्रिया बैचों (Batches) में होती है, निरंतर रूप से नहीं।
- **उदाहरण: फार्मास्युटिकल और खाद्य प्रसंस्करण उद्योग।**

प्रक्रिया नियंत्रण के लाभ (Benefits of Process Control)

1. उच्च गुणवत्ता और स्थिरता (Improved Product Quality & Consistency)

✅ यह उत्पाद की गुणवत्ता को **स्थिर बनाए रखता है और मानक विनिर्देशों** का पालन सुनिश्चित करता है।
✅ विभिन्न **उद्योग मानकों और सरकारी नियमों** को बनाए रखने में मदद करता है।

2. दक्षता और उत्पादकता में वृद्धि (Increased Efficiency & Productivity)

✅ संसाधनों (Resources) का **सही उपयोग** करता है, जिससे **अपशिष्ट (Waste) और ऊर्जा खपत (Energy Consumption) कम होती है।**
✅ **कम मानवीय हस्तक्षेप (Less Human Intervention)** के कारण त्रुटियों की संभावना घटती है।

3. सुरक्षा में सुधार (Enhanced Safety)

✅ संभावित खतरनाक स्थितियों को **पहले से पता करके उन्हें रोकता** है।
✅ **रासायनिक संयंत्र (Chemical Plant) और परमाणु संयंत्र (Nuclear Plant)** जैसे जोखिम भरे उद्योगों में दुर्घटनाओं की संभावना को कम करता है।

4. लागत में बचत (Cost Savings)

✅ **कच्चे माल (Raw Material) और ऊर्जा की खपत को कम करता है**, जिससे उत्पादन लागत घटती है।
✅ **समय से पहले खराबी (Breakdowns) को रोकता है**, जिससे रखरखाव की लागत कम होती है।

5. परिवर्तनों के प्रति तेज़ प्रतिक्रिया (Faster Response to Changes)

✅ प्रक्रिया नियंत्रण प्रणाली **बाहरी बाधाओं (Disturbances)** का पता लगाकर स्वचालित रूप से समायोजन करती है।
✅ अनावश्यक देरी को रोककर **प्रक्रिया को सुचारू रूप से संचालित रखता है।**

6. नियमों और मानकों का अनुपालन (Regulatory Compliance)

✅ यह प्रणाली सरकार और उद्योगों के **पर्यावरणीय और गुणवत्ता मानकों** का पालन सुनिश्चित करती है।
✅ नियमों का उल्लंघन करने पर लगने वाले **अर्थदंड (Fines) और कानूनी समस्याओं** से बचाता है।

7. रिमोट मॉनिटरिंग और कंट्रोल (Remote Monitoring & Control)

✅ आधुनिक प्रक्रिया नियंत्रण प्रणालियाँ दूरस्थ स्थानों (Remote Locations) से निगरानी और नियंत्रण की अनुमति देती हैं।
✅ **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) सिस्टम** का उपयोग पावर ग्रिड और जल प्रबंधन प्रणालियों में किया जाता है।

प्रक्रिया नियंत्रण के अनुप्रयोग (Applications of Process Control)

1. रासायनिक और पेट्रोकेमिकल उद्योग (Chemical & Petrochemical Industry)

✅ **तापमान, दाब और प्रवाह दर** को नियंत्रित करना।
✅ **उदाहरण:** तेल रिफाइनरी, गैस प्रसंस्करण संयंत्र।

2. ऊर्जा उत्पादन (Power Plants)

✅ **भाप का दाब (Steam Pressure), ईंधन प्रवाह (Fuel Flow), और जनरेटर आउटपुट (Generator Output) को नियंत्रित करना।**
✅ **उदाहरण:** थर्मल, परमाणु और जल विद्युत संयंत्र।

3. खाद्य और पेय उद्योग (Food & Beverage Industry)

✅ **तापमान नियंत्रण, मिश्रण अनुपात (Mixing Ratios) और नसबंदी (Sterilization)** को सुनिश्चित करना।
✅ **उदाहरण:** डेयरी प्रसंस्करण, ब्रुअरी, और पैकेजिंग।

4. औषधीय उद्योग (Pharmaceutical Industry)

✅ **दवा निर्माण (Drug Formulation) और नसबंदी (Sterilization) की सटीकता बनाए रखना।**
✅ **उदाहरण:** टीका उत्पादन, टैबलेट निर्माण।

5. जल उपचार संयंत्र (Water Treatment Plants)

✅ **pH स्तर, जल निस्पंदन (Water Filtration) और रसायन खुराक (Chemical Dosing) को नियंत्रित करना।**
✅ **उदाहरण:** पेयजल शुद्धिकरण, अपशिष्ट जल उपचार।

6. ऑटोमोटिव और निर्माण उद्योग (Automotive & Manufacturing Industry)

✅ **असेंबली लाइनों, वेल्डिंग और पेंटिंग को स्वचालित बनाना।**
✅ **उदाहरण:** कार निर्माण में रोबोटिक आर्म्स।

Control actions

An automatic controller compares the actual value of the system output with the reference input (desired value), determines the deviation, and produces a control signal that will reduce the deviation to zero or a small value. The manner in which the automatic controller produces the control signal is called the control action. The controllers may be classified according to their control actions as

1) Two position or on-off controllers

2) Proportional controllers

3) Integral controllers

4) Proportional-plus- integral controllers

5) Proportional-plus-derivative controllers

6) Proportional-plus-integral-plus-derivative controllers

A two position controller has two fixed positions usually on or off. A proportional control system is a feedback control system in which the output forcing function is directly proportional to error.

A integral control system is a feedback control system in which the output forcing function is directly proportional to the first time integral of error.

A proportional-plus-integral control system is a feedback control system in which the output forcing function is a linear combination of the error and its first time integral.

A proportional-plus-derivative control system is a feedback control system in which the output forcing function is a linear combination of the error and its first time derivative.

A proportional-plus-derivative-plus-integral control system is a feedback control system in which the output forcing function is a linear combination of the error, its first time derivative and its first time integral.

Many industrial controllers are electric, hydraulic, pneumatic, electronic or their combinations. The choice of the controller is based on the nature of plant and operating conditions.

Controllers may also be classified according to the power employed in the operation as

1) Electric controllers

2) Hydraulic controllers

3) Pneumatic controllers

4) Electronic controllers.

नियंत्रण क्रियाएँ:

स्वचालित नियंत्रक सिस्टम आउटपुट के वास्तविक मान की तुलना संदर्भ इनपुट (वांछित मान) से करता है, विचलन निर्धारित करता है, और एक नियंत्रण संकेत उत्पन्न करता है जो विचलन को शून्य या एक छोटे मान तक कम कर देगा। जिस तरीके से स्वचालित नियंत्रक नियंत्रण

संकेत उत्पन्न करता है उसे नियंत्रण क्रिया कहा जाता है। नियंत्रकों को उनकी नियंत्रण क्रियाओं के अनुसार वर्गीकृत किया जा सकता है

1) दो स्थिति या चालू-बंद नियंत्रक
2) आनुपातिक नियंत्रक
3) इंटीग्रल नियंत्रक
4) आनुपातिक-प्लस-इंटीग्रल नियंत्रक
5) आनुपातिक-प्लस-व्युत्पन्न नियंत्रक
6) आनुपातिक-प्लस-इंटीग्रल-प्लस-व्युत्पन्न नियंत्रक

दो स्थिति नियंत्रक में दो निश्चित स्थितियाँ होती हैं जो आमतौर पर चालू या बंद होती हैं। आनुपातिक नियंत्रण प्रणाली एक फीडबैक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें आउटपुट फोर्सिंग फ़ंक्शन त्रुटि के सीधे आनुपातिक होता है।

एक इंटीग्रल कंट्रोल सिस्टम एक फीडबैक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें आउटपुट फोर्सिंग फ़ंक्शन त्रुटि के पहले समय इंटीग्रल के सीधे आनुपातिक होता है।

एक आनुपातिक-प्लस-इंटीग्रल नियंत्रण प्रणाली एक फीडबैक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें आउटपुट फोर्सिंग फ़ंक्शन त्रुटि और उसके पहले समय इंटीग्रल का एक रैखिक संयोजन होता है।

एक आनुपातिक-प्लस-व्युत्पन्न नियंत्रण प्रणाली एक फीडबैक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें आउटपुट फोर्सिंग फ़ंक्शन त्रुटि और उसके पहले समय व्युत्पन्न का एक रैखिक संयोजन होता है।

आनुपातिक-प्लस-व्युत्पन्न-प्लस-अभिन्न नियंत्रण प्रणाली एक फीडबैक नियंत्रण प्रणाली है जिसमें आउटपुट फोर्सिंग फ़ंक्शन त्रुटि, उसके पहले समय व्युत्पन्न और उसके पहले समय अभिन्न का एक रैखिक संयोजन है।

कई औद्योगिक नियंत्रक इलेक्ट्रिक, हाइड्रोलिक, वायवीय, इलेक्ट्रॉनिक या उनके संयोजन हैं। नियंत्रक का चुनाव संयंत्र की प्रकृति और परिचालन स्थितियों पर आधारित है।

नियंत्रकों को संचालन में नियोजित शक्ति के अनुसार भी वर्गीकृत किया जा सकता है

1) इलेक्ट्रिक नियंत्रक
2) हाइड्रोलिक नियंत्रक
3) वायवीय नियंत्रक

4) इलेक्ट्रॉनिक नियंत्रक।

Two-Position (On-Off) Controllers

A **Two-Position Controller**, also known as an **On-Off Controller**, is the simplest type of automatic control system. It operates by switching the output between two discrete states:

✅ **Fully ON (100% output)**
❌ **Fully OFF (0% output)**

The controller turns **ON** when the process variable (measured parameter) falls below the desired setpoint and turns **OFF** when it exceeds the setpoint.

Key Characteristics:

✔ Simple and cost-effective
✔ Easy to implement
✔ No intermediate control—only ON or OFF states
✔ Works best for slow and less-sensitive processes

Working Principle of On-Off Controllers

1. The controller **monitors the process variable (PV)** (e.g., temperature, pressure, or level).
2. It **compares PV with the set point (SP)** (desired value).
3. If **PV < SP**, the controller **switches ON** the actuator.
4. If **PV > SP**, the controller **switches OFF** the actuator.

🔷 This leads to **continuous cycling (hysteresis)** around the set point.

Hysteresis in On-Off Controllers

Since an On-Off Controller switches between two states, it can cause frequent **rapid switching** (chattering). To prevent this, a **dead zone (hysteresis band)** is introduced.

🔶 **Hysteresis** is the small difference between the ON and OFF switching points, reducing unnecessary switching.

Example: A thermostat with a **setpoint of 25°C** may turn ON at **24°C** and turn OFF at **26°C** instead of switching at exactly 25°C.

Applications of On-Off Controllers

1. **Thermostats** (Heating and cooling systems)
2. **Water level controllers** (Tank filling systems)
3. **Pressure switches** (Air compressors)
4. **Refrigeration systems** (Temperature regulation)
5. **Light control systems** (Automatic street lights)

Advantages of On-Off Controllers

✅ Simple and easy to design
✅ Low cost and reliable
✅ No complex calculations required
✅ Suitable for slow-response systems

Disadvantages of On-Off Controllers

❌ Causes oscillations around the setpoint
❌ Not suitable for precise control
❌ Can cause wear and tear in mechanical components due to frequent switching
❌ Inefficient for fast or highly sensitive processes

दो-स्थिति (On-Off) नियंत्रक

दो-स्थिति नियंत्रक (Two-Position Controller), जिसे **ऑन-ऑफ नियंत्रक (On-Off Controller)** भी कहा जाता है, **सबसे सरल प्रकार की स्वचालित नियंत्रण प्रणाली (Automatic Control System)** है। यह केवल **दो स्थितियों (States)** में कार्य करता है:

✅ **पूर्ण रूप से चालू (ON - 100% आउटपुट)**
❌ **पूर्ण रूप से बंद (OFF - 0% आउटपुट)**

इस नियंत्रक का संचालन बहुत आसान है:

- जब **प्रक्रिया चर (Process Variable - PV)** सेटपॉइंट (Setpoint - SP) से नीचे चला जाता है, तो नियंत्रक **ON** हो जाता है।
- जब **PV सेटपॉइंट से ऊपर चला जाता है, तो नियंत्रक OFF** हो जाता है।

मुख्य विशेषताएँ (Key Characteristics):

✔ सरल और किफायती (Simple & Cost-effective)
✔ लागू करना आसान (Easy to Implement)
✔ कोई मध्यवर्ती स्थिति नहीं (Only ON or OFF States)
✔ धीमी और कम संवेदनशील प्रक्रियाओं के लिए उपयुक्त (Best for Slow & Less-Sensitive Processes)

ऑन-ऑफ नियंत्रक का कार्य सिद्धांत (Working Principle)

1. **नियंत्रक प्रक्रिया चर (PV) को मापता है।**
2. **PV और सेटपॉइंट (SP) की तुलना करता है।**
3. यदि **PV < SP**, तो नियंत्रक **सक्रिय (ON)** हो जाता है।
4. यदि **PV > SP**, तो नियंत्रक **निष्क्रिय (OFF)** हो जाता है।

🔹 यह प्रणाली लगातार **चालू और बंद (Switching ON & OFF)** होती रहती है, जिससे **हिस्टेरेसिस (Hysteresis)** उत्पन्न हो सकता है।

हिस्टेरेसिस (Hysteresis) और इसकी भूमिका

चूंकि ऑन-ऑफ नियंत्रक **सिर्फ दो स्थितियों में कार्य करता है**, यह कई बार **तेज़ी से चालू और बंद (Frequent Switching)** होने लगता है। इसे **हिस्टेरेसिस बैंड (Hysteresis Band) या डेड जोन (Dead Zone)** के माध्यम से नियंत्रित किया जाता है।

🔸 **हिस्टेरेसिस बैंड** एक छोटा अंतर होता है जहां नियंत्रक ON से OFF में स्विच करने में थोड़ा विलंब करता है।

📌 **उदाहरण:**

अगर **एक थर्मोस्टेट का सेटपॉइंट 25°C** है, तो बिना हिस्टेरेसिस के यह 25°C पर लगातार ON और OFF होगा। लेकिन **यदि हिस्टेरेसिस बैंड 1°C** रखा जाए, तो यह **24°C पर ON और 26°C पर OFF** होगा, जिससे अनावश्यक स्विचिंग कम होगी।

ऑन-ऑफ नियंत्रकों के अनुप्रयोग (Applications)

1 **थर्मोस्टेट (Thermostat)** - तापमान नियंत्रण (Heating & Cooling Systems)
2 **जल स्तर नियंत्रक (Water Level Controller)** - टंकी में जल स्तर नियंत्रण
3 **दाब स्विच (Pressure Switches)** - एयर कंप्रेसर में प्रेशर नियंत्रण
4 **रेफ्रिजरेशन सिस्टम (Refrigeration Systems)** - फ्रिज और ए.सी. में तापमान नियंत्रण
5 **ऑटोमैटिक लाइट कंट्रोल (Automatic Light Control)** - स्ट्रीट लाइट सिस्टम

ऑन-ऑफ नियंत्रकों के लाभ (Advantages)

✅ **सरल और सस्ता (Simple & Low Cost)**
✅ **उच्च विश्वसनीयता (High Reliability)**
✅ **कोई जटिल गणना की आवश्यकता नहीं (No Complex Calculations Needed)**
✅ **धीमी प्रक्रियाओं के लिए उपयुक्त (Suitable for Slow-Response Systems)**

ऑन-ऑफ नियंत्रकों की सीमाएँ (Disadvantages)

❌ **ऑसिलेशन (Oscillations) उत्पन्न करता है** - सेटपॉइंट के आसपास आउटपुट **ON और OFF** होता रहता है।
❌ **सटीक नियंत्रण की कमी (Lack of Precision Control)** - यह केवल दो स्थितियों में कार्य करता है।
❌ **तेज़ी से स्विचिंग होने से उपकरण खराब हो सकते हैं (Frequent Switching Causes Wear & Tear)**।

❌ तेज़ और संवेदनशील प्रक्रियाओं के लिए अनुपयुक्त (Not Suitable for Fast or Sensitive Processes)।

Proportional-plus- integral controllers:

The proportional controller commonly known as PI controller is an essential part of the Industrial Automation and Control system. It is a closed-loop feedback control mechanism that aims to adjust the process variable by manipulating the variable based on the error between the set point and the process variable. It strikes a balance between quick response to deviations and long-term error elimination.

A **Proportional-Plus-Integral (PI) Controller** is a type of feedback control system used to maintain a desired output by adjusting the control input. It combines two components:

1. **Proportional Control (P)** – Reacts to the current error (difference between setpoint and actual value) to provide an immediate response.
2. **Integral Control (I)** – Accounts for the accumulation of past errors to eliminate steady-state error and improve accuracy.

Mathematical Representation

The control output u (t) of a PI controller is given by:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i e(t)dt$$

Where:

- K_p= Proportional gain
- K_i = Integral gain
- $e(t)$= Error signal (setpoint - process variable)
- e(t)dt = Integral of the error over time

Advantages of PI Controllers

- Eliminates steady-state error (unlike a pure proportional controller).
- Provides a balance between fast response (from PPP) and accuracy (from III).
- Simple to implement compared to full PID controllers.

Disadvantages

- Can introduce overshoot and oscillations if not tuned properly.
- Integral action can cause "integral windup," where the accumulated error leads to excessive control action.

Applications

- Industrial process control (temperature, pressure, speed, etc.).
- Motor speed control.
- Robotics and automation systems.

प्रोपोर्शनल-प्लस-इंटीग्रल (PI) नियंत्रक:

> आनुपातिक नियंत्रक जिसे आमतौर पर PI नियंत्रक के रूप में जाना जाता है, औद्योगिक स्वचालन और नियंत्रण प्रणाली का एक अनिवार्य हिस्सा है। यह एक बंद लूप फीडबैक नियंत्रण तंत्र है जिसका उद्देश्य सेटपॉइंट और प्रक्रिया चर के बीच त्रुटि के आधार पर चर में हेरफेर करके प्रक्रिया चर को समायोजित करना है। यह विचलन के लिए त्वरित प्रतिक्रिया और दीर्घकालिक त्रुटि उन्मूलन के बीच संतुलन बनाता है।

प्रोपोर्शनल-प्लस-इंटीग्रल (PI) नियंत्रक एक प्रकार का **फीडबैक नियंत्रण प्रणाली (Feedback Control System)** है, जिसका उपयोग किसी सिस्टम के आउटपुट को वांछित स्तर पर बनाए रखने के लिए किया जाता है। यह दो भागों से मिलकर बना होता है:

1. **प्रोपोर्शनल नियंत्रण (P - Proportional Control)** - वर्तमान त्रुटि (Error) पर प्रतिक्रिया करता है और तुरंत प्रतिक्रिया देता है।
2. **इंटीग्रल नियंत्रण (I - Integral Control)** - पिछली त्रुटियों (Past Errors) का संचय करता है और स्थिर-स्थिति त्रुटि (Steady-State Error) को समाप्त करने में मदद करता है।

गणितीय अभिव्यक्ति (Mathematical Representation)

PI नियंत्रक का आउटपुट u(t) निम्नलिखित समीकरण से व्यक्त किया जाता है:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i e(t)dt$$

जहाँ:

- K_p = प्रोपोर्शनल गेन (Proportional Gain)
- K_i = इंटीग्रल गेन (Integral Gain)
- $e(t)$= त्रुटि संकेत (Error Signal) = सेटपॉइंट - वास्तविक मान
- $e(t)dt$ = त्रुटि का एकीकरण (Integral of the Error)

PI नियंत्रक के लाभ (Advantages)

✅ स्थिर-स्थिति त्रुटि (Steady-State Error) को समाप्त करता है।
✅ तेज़ प्रतिक्रिया (Fast Response) और उच्च सटीकता (High Accuracy) प्रदान करता है।
✅ PID नियंत्रक की तुलना में सरल और सस्ता होता है।

PI नियंत्रक की सीमाएँ (Disadvantages)

❌ अत्यधिक ओवरशूट (Overshoot) और कंपन (Oscillations) उत्पन्न कर सकता है।
❌ इंटीग्रल विंडअप (Integral Windup) की समस्या हो सकती है, जिसमें बड़ी त्रुटि का संचय नियंत्रण कार्य को अत्यधिक प्रभावित कर सकता है।

PI नियंत्रक के अनुप्रयोग (Applications)

🔷 औद्योगिक प्रक्रिया नियंत्रण (Industrial Process Control) - तापमान, दबाव, प्रवाह आदि।
🔷 मोटर स्पीड नियंत्रण (Motor Speed Control)।
🔷 रोबोटिक्स और स्वचालन प्रणाली (Robotics & Automation Systems)।

Proportional-Plus-Derivative (PD) Controller:

A proportional Integral Derivative controller also called a PID controller, is a widely used feedback control mechanism in industrial automation. It aims to regulate a process variable by adjusting a manipulated variable based on the error between the set point and the actual process variable.

A **Proportional-Plus-Derivative (PD) Controller** is a type of control system that improves system response by combining:

1. **Proportional Control (P):** Reacts to the present error and provides immediate correction.

2. **Derivative Control (D):** Predicts future error based on its rate of change and provides a damping effect, reducing overshoot and improving stability.

Mathematical Representation

The control output u(t) of a PD controller is given by:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Where:

- K_p= Proportional gain
- K_d= Derivative gain
- $e(t)$ =Error signal (Setpoint - Process variable)
- $\frac{d}{dt} e(t)$= Derivative of the error

Advantages of PD Controllers

✅ **Improves system stability** by reducing oscillations.
✅ **Enhances transient response** by damping overshoot.
✅ **Speeds up system response** by anticipating error trends.

Disadvantages

❌ **Cannot eliminate steady-state error** as it lacks an integral term.
❌ **Sensitive to noise**, especially in high-frequency signals.

Applications of PD Controllers

🔷 **Robotics & Automation:** Provides precise motion control.
🔷 **Cruise Control in Vehicles:** Helps in reducing speed fluctuations.
🔷 **Aerospace & Drones:** Enhances stability and maneuverability.

प्रोपोर्शनल-प्लस-डेरिवेटिव (PD) नियंत्रक:

आनुपातिक इंटीग्रल डेरिवेटिव नियंत्रक जिसे PID नियंत्रक भी कहा जाता है, औद्योगिक स्वचालन में व्यापक रूप से उपयोग किया जाने वाला फीडबैक नियंत्रण तंत्र है। इसका उद्देश्य

सेट पॉइंट और वास्तविक प्रक्रिया चर के बीच त्रुटि के आधार पर हेरफेर किए गए चर को समायोजित करके प्रक्रिया चर को विनियमित करना है।

प्रोपोर्शनल-प्लस-डेरिवेटिव (PD) नियंत्रक एक प्रकार की नियंत्रण प्रणाली है, जो सिस्टम की प्रतिक्रिया को बेहतर बनाने के लिए दो घटकों का संयोजन करती है:

1. **प्रोपोर्शनल नियंत्रण (P - Proportional Control):** वर्तमान त्रुटि (Error) पर प्रतिक्रिया करता है और तुरंत सुधार प्रदान करता है।
2. **डेरिवेटिव नियंत्रण (D - Derivative Control):** त्रुटि के परिवर्तन की दर (Rate of Change of Error) को ध्यान में रखता है और एक पूर्वानुमानित सुधार प्रदान करता है, जिससे ओवरशूट कम होता है और स्थिरता बढ़ती है।

गणितीय अभिव्यक्ति (Mathematical Representation)

PD नियंत्रक का आउटपुट u (t) निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त किया जाता है:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

जहाँ:

- K_p = प्रोपोर्शनल गेन (Proportional Gain)
- K_d = डेरिवेटिव गेन (Derivative Gain)
- $e(t)$ = त्रुटि संकेत (Error Signal) = सेटपॉइंट - वास्तविक मान
- $\frac{d}{dt} e(t)$= त्रुटि का अवकलन (Derivative of Error)

PD नियंत्रक के लाभ (Advantages)

✅ सिस्टम की स्थिरता (Stability) में सुधार करता है।
✅ अस्थायी प्रतिक्रिया (Transient Response) को बेहतर बनाता है और ओवरशूट कम करता है।
✅ त्रुटि के भविष्य के रुझान (Future Error Trends) का पूर्वानुमान लगाकर सिस्टम की गति बढ़ाता है।

PD नियंत्रक की सीमाएँ (Disadvantages)

❌ स्थिर-स्थिति त्रुटि (Steady-State Error) को समाप्त नहीं कर सकता, क्योंकि इसमें इंटीग्रल नियंत्रण नहीं होता।
❌ उच्च आवृत्ति संकेतों (High-Frequency Signals) में शोर (Noise) के प्रति संवेदनशील होता है।

PD नियंत्रक के अनुप्रयोग (Applications)

🔷 **रोबोटिक्स और स्वचालन (Robotics & Automation):** सटीक गति नियंत्रण (Precise Motion Control) के लिए।
🔷 **वाहनों में क्रूज़ नियंत्रण (Cruise Control in Vehicles):** गति में उतार-चढ़ाव को कम करने के लिए।
🔷 **एयरोस्पेस और ड्रोन नियंत्रण (Aerospace & Drone Control):** स्थिरता और गतिशीलता को बेहतर बनाने के लिए।

Proportional-Plus-Integral-Plus-Derivative (PID) Controller:

A proportional Integral Derivative controller also called a PID controller is a widely used feedback control mechanism in industrial automation. It aims to regulate a process variable by adjusting a manipulated variable based on the error between the set point and the actual process variable.

A **Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller** is one of the most widely used control systems in engineering and automation. It combines three types of control actions:

1. **Proportional Control (P):** Reacts to the present error and provides an immediate correction.
2. **Integral Control (I):** Accumulates past errors to eliminate steady-state error.
3. **Derivative Control (D):** Predicts future errors by considering the rate of change of error, improving system stability.

Mathematical Representation

The control output u(t) of a PID controller is given by:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Where:

- K_p = Proportional gain
- K_i= Integral gain
- K_d = Derivative gain
- $e(t)$ = Error signal (Setpoint - Process variable)
- $e(t)dt$ = Integral of error
- $\frac{d}{dt}e(t)$= Derivative of error

Advantages of PID Controllers

✅ Provides fast response (p), eliminates steady-state error (i), and improves stability (d).
☑️ Works well for complex systems with varying dynamics.
☑️ Widely applicable in industrial automation, robotics, and process control.

Disadvantages

❌ **Difficult to tune correctly (setting K_p, K_i, and K_d values).**
❌ **Sensitive to noise due to derivative action.**
❌ **Can lead to instability if not properly tuned.**

Applications of PID Controllers

🔷 **Temperature Control:** Used in HVAC systems and industrial furnaces.
🔷 **Motor Speed & Position Control:** Found in robotics and servo systems.
🔷 **Process Control:** Used in chemical plants, power plants, and manufacturing.
🔷 **Drone & Aircraft Control:** Helps maintain stability and smooth flight.

प्रोपोर्शनल-प्लस-इंटीग्रल-प्लस-डेरिवेटिव (PID) नियंत्रक:

आनुपातिक इंटीग्रल डेरिवेटिव नियंत्रक जिसे PID नियंत्रक भी कहा जाता है, औद्योगिक स्वचालन में व्यापक रूप से उपयोग किया जाने वाला फीडबैक नियंत्रण तंत्र है। इसका उद्देश्य सेट पॉइंट और वास्तविक प्रक्रिया चर के बीच त्रुटि के आधार पर हेरफेर किए गए चर को समायोजित करके प्रक्रिया चर को विनियमित करना है।

प्रोपोर्शनल-इंटीग्रल-डेरिवेटिव (PID) नियंत्रक एक व्यापक रूप से उपयोग की जाने वाली नियंत्रण प्रणाली है, जो तीन प्रकार के नियंत्रण क्रियाओं को जोड़ती है:

1. **प्रोपोर्शनल नियंत्रण (P - Proportional Control):** वर्तमान त्रुटि (Error) पर प्रतिक्रिया करता है और तुरंत सुधार प्रदान करता है।

2. **इंटीग्रल नियंत्रण (I - Integral Control):** पिछली त्रुटियों को जोड़ता है और स्थिर-स्थिति त्रुटि (Steady-State Error) को समाप्त करता है।
3. **डेरिवेटिव नियंत्रण (D - Derivative Control):** त्रुटि के परिवर्तन की दर को ध्यान में रखता है, जिससे ओवरशूट (Overshoot) कम होता है और स्थिरता बढ़ती है।

गणितीय अभिव्यक्ति (Mathematical Representation)

PID नियंत्रक का आउटपुट u(t) निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त किया जाता है:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

जहाँ:

- K_p = प्रोपोर्शनल गेन (Proportional Gain)
- K_i= इंटीग्रल गेन (Integral Gain)
- K_d= डेरिवेटिव गेन (Derivative Gain)
- $e(t)$ = त्रुटि संकेत (Error Signal) = सेटपॉइंट - वास्तविक मान
- $e(t)dt$ = त्रुटि का एकीकरण (Integral of Error)
- $\frac{d}{dt}e(t)$= त्रुटि का अवकलन Derivative of error

PID नियंत्रक के लाभ (Advantages)

✅ तेज़ प्रतिक्रिया (Fast Response) देता है और स्थिर-स्थिति त्रुटि को समाप्त करता है।
✅ प्रणाली की स्थिरता (Stability) में सुधार करता है और ओवरशूट को कम करता है।
✅ औद्योगिक स्वचालन (Industrial Automation), रोबोटिक्स (Robotics), और प्रक्रिया नियंत्रण (Process Control) में प्रभावी रूप से कार्य करता है।

PID नियंत्रक की सीमाएँ (Disadvantages)

❌ सही तरीके से ट्यून करना कठिन होता है (K_p,K_i, और K_d का सही चयन आवश्यक है)।
✖ डेरिवेटिव क्रिया के कारण शोर (Noise) के प्रति संवेदनशील हो सकता है।
✖ यदि सही ढंग से ट्यून नहीं किया गया तो अस्थिरता (Instability) उत्पन्न कर सकता है।

PID नियंत्रक के अनुप्रयोग (Applications)

🔷 **तापमान नियंत्रण (Temperature Control):** HVAC सिस्टम और औद्योगिक भट्टियों (Furnaces) में।
🔷 **मोटर गति और स्थिति नियंत्रण (Motor Speed & Position Control):** रोबोटिक्स और सर्वो सिस्टम (Servo Systems) में।
🔷 **औद्योगिक प्रक्रिया नियंत्रण (Process Control):** रासायनिक संयंत्र (Chemical Plants), पावर प्लांट और मैन्युफैक्चरिंग में।
🔷 **ड्रोन और विमान नियंत्रण (Drone & Aircraft Control):** स्थिरता और उड़ान को सुचारू रूप से बनाए रखने में।

Components of a Control System

A **control system** is a system that regulates the behavior of a process or device to achieve a desired output. It consists of several components that work together to monitor, compare, and adjust system performance.

Main Components of a Control System

1. Input (Setpoint)

- It is the desired value that the system should achieve.
- Example: In an air conditioning system, the user sets the temperature to **24°C**.

2. Process/System (Plant)

- The process that needs to be controlled.
- Example: The air conditioner cooling the room.

3. Controller

- It processes the error signal and determines the corrective action.
- Types of controllers:
  - **Proportional (P) Controller**
  - **Proportional-Integral (PI) Controller**
  - **Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller**

4. Feedback System

- Measures the actual output and sends it back to the controller.
- Example: A temperature sensor in an AC measures the room temperature and sends it back to the system.

5. Comparator (Error Detector)

- Compares the setpoint (desired value) with the actual output.
- If there is a difference (error), the controller takes corrective action.

6. Actuator

- The device that applies the controller's output to the system.
- Example: A motor in an AC that adjusts the cooling based on control signals.

7. Output (Controlled Variable)

- The final result after the control action.
- Example: The room temperature reaching **24°C** in an AC system.

नियंत्रण प्रणाली के घटक (Components of Control System)

नियंत्रण प्रणाली (Control System) एक ऐसी प्रणाली होती है जो किसी प्रक्रिया या यंत्र के व्यवहार को नियंत्रित करके वांछित आउटपुट प्राप्त करने में मदद करती है। इसमें विभिन्न घटक (Components) होते हैं जो सिस्टम की निगरानी, तुलना और समायोजन करते हैं।

नियंत्रण प्रणाली के मुख्य घटक

1. इनपुट (Setpoint/Input)

- यह वह वांछित मान (Desired Value) होता है जिसे प्रणाली को प्राप्त करना होता है।
- **उदाहरण:** एयर कंडीशनर (AC) में उपयोगकर्ता **24°C** का तापमान सेट करता है।

2. प्रक्रिया / प्रणाली (Process/System or Plant)

- यह वह प्रक्रिया होती है जिसे नियंत्रित किया जाता है।
- **उदाहरण:** एयर कंडीशनर द्वारा कमरे को ठंडा करना।

3. नियंत्रक (Controller)

- यह त्रुटि संकेत (Error Signal) को संसाधित करता है और सुधारात्मक क्रिया (Corrective Action) निर्धारित करता है।
- नियंत्रकों के प्रकार:
    - **प्रोपोर्श्नल (P) नियंत्रक**
    - **प्रोपोर्श्नल-प्लस-इंटीग्रल (PI) नियंत्रक**
    - **प्रोपोर्श्नल-प्लस-इंटीग्रल-प्लस-डेरिवेटिव (PID) नियंत्रक**

4. फीडबैक प्रणाली (Feedback System)

- यह वास्तविक आउटपुट को मापता है और इसे नियंत्रक को वापस भेजता है।
- **उदाहरण:** एक तापमान सेंसर (Temperature Sensor) कमरे के वास्तविक तापमान को मापकर AC को जानकारी देता है।

5. तुलनाकार (Comparator/Error Detector)

- यह वांछित मान (Setpoint) और वास्तविक आउटपुट (Actual Output) की तुलना करता है।
- यदि कोई अंतर (Error) होता है, तो नियंत्रक इसे सुधारने के लिए कार्रवाई करता है।

6. एक्चुएटर (Actuator)

- यह नियंत्रक के आउटपुट को सिस्टम में लागू करता है।
- **उदाहरण:** AC का कंप्रेसर या मोटर जो तापमान के अनुसार कूलिंग को समायोजित करता है।

7. आउटपुट (Controlled Output)

- यह अंतिम परिणाम होता है जो नियंत्रण क्रिया के बाद प्राप्त होता है।
- **उदाहरण:** कमरे का तापमान **24°C** तक पहुँच जाना।

Construction, working and concept of ac servomotor:

A servomotor acts like a rotary actuator that is mainly used to change electrical input into mechanical acceleration. This motor works based on servomechanism wherever the position feedback is utilized for controlling the speed & the final location of the motor. Servo motors turn & get a certain angle based on the applied input. Servo motors are small in size but they are very energy efficient. These motors are classified into two types like ac servomotor & dc servomotor but the main difference between these two motors is the source of power used. The performance of a DC_servo_motor mainly depends on voltage only whereas an AC servo motor depends on both the voltage & frequency.

एसी सर्वोमोटर का निर्माण, कार्य और अवधारणा:

सर्वोमोटर एक रोटरी एक्ट्यूएटर की तरह काम करता है जिसका उपयोग मुख्य रूप से विद्युत इनपुट को यांत्रिक त्वरण में बदलने के लिए किया जाता है। यह मोटर सर्वोमैकेनिज्म के आधार पर काम करती है जहाँ मोटर की गति और अंतिम स्थान को नियंत्रित करने के लिए स्थिति फीडबैक का उपयोग किया जाता है। सर्वो मोटर लगाए गए इनपुट के आधार पर मुड़ती हैं और एक निश्चित कोण प्राप्त करती हैं। सर्वो मोटर आकार में छोटी होती हैं लेकिन वे बहुत ऊर्जा कुशल होती हैं। इन मोटरों को एसी सर्वोमोटर और डीसी सर्वोमोटर जैसे दो प्रकारों में वर्गीकृत किया जाता है लेकिन इन दोनों मोटरों के बीच मुख्य अंतर उपयोग की जाने वाली शक्ति का स्रोत है। डीसी सर्वो मोटर का प्रदर्शन मुख्य रूप से केवल वोल्टेज पर निर्भर करता है जबकि एसी सर्वो मोटर वोल्टेज और आवृत्ति दोनों पर निर्भर करता है।

What is AC Servo Motor?

A type of servomotor that generates mechanical output by using AC electrical input in the precise angular velocity form is called an AC servo motor. The output power obtained from this servomotor mainly ranges from watts to a few 100 watts. The operating frequency of ac servo motor ranges from 50 to 400 Hz.

An **AC servomotor** is a specialized type of electric motor used in servo systems to provide precise control of position, velocity, and acceleration. It operates on **alternating current (AC)** and is commonly used in industrial automation, robotics, CNC machines, and aerospace applications.

AC servomotors are different from conventional AC motors as they offer **fast response, high efficiency, and better accuracy** in closed-loop control systems.

AC servomotors are generally **two-phase induction motors** or **synchronous motors** with specific design modifications to improve their dynamic performance.

एसी सर्वो मोटर क्या है?

सर्वोमोटर का एक प्रकार जो सटीक कोणीय वेग के रूप में एसी विद्युत इनपुट का उपयोग करके यांत्रिक आउटपुट उत्पन्न करता है, उसे एसी सर्वो मोटर कहा जाता है। इस सर्वोमोटर से प्राप्त आउटपुट पावर मुख्य रूप से वाट से लेकर कुछ 100 वाट तक होती है। एसी सर्वो मोटर की ऑपरेटिंग आवृत्ति 50 से 400 हर्ट्ज तक होती है।

एसी सर्वोमोटर एक विशेष प्रकार की इलेक्ट्रिक मोटर है जिसका उपयोग सर्वो सिस्टम में स्थिति, वेग और त्वरण का सटीक नियंत्रण प्रदान करने के लिए किया जाता है। यह प्रत्यावर्ती धारा (एसी) पर संचालित होता है और आमतौर पर औद्योगिक स्वचालन, रोबोटिक्स, सीएनसी मशीनों और एयरोस्पेस अनुप्रयोगों में उपयोग किया जाता है।

एसी सर्वोमोटर पारंपरिक एसी मोटरों से अलग होते हैं क्योंकि वे बंद-लूप नियंत्रण प्रणालियों में तेज़ प्रतिक्रिया, उच्च दक्षता और बेहतर सटीकता प्रदान करते हैं।

एसी सर्वोमोटर आम तौर पर दो-चरण प्रेरण मोटर या सिंक्रोनस मोटर होते हैं जिनमें उनके गतिशील प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए विशिष्ट डिज़ाइन संशोधन होते हैं।

Main Components:

1. **Stator**
   - The stator has two windings: **main winding (fixed) and control winding (variable)**.
   - The control winding receives input voltage to regulate speed and torque.
   - The stator is the component of the motor that does not rotate and comprises the coils that create the rotating magnetic field given electricity from the source. The speed of operation of the motor depends on the number of poles of the stator.
2. **Rotor**
   - The rotor is usually **squirrel cage type** or **drag-cup type** (lightweight to reduce inertia).
   - Some servomotors use wound rotors for better performance.
   - The rotor is the rotating component of the motor with a permanent magnet or a field, which is usually formed of electromagnets. The working of the motor is based on the idea that the rotor creates torque through interaction with the stator's magnetic field.
3. **Shaft & Bearings**
   - Bearings are used to support the shaft, especially the rotor, and they provide low friction for rotational movement.

   - The shaft transmits motion, and high-precision bearings ensure smooth operation.
4. **Feedback Mechanism (Tachometer/Encoder)**
   - In modern servomotors, an encoder or resolver provides feedback to the controller for precise motion control. This is one of the crucial features that update the position of the motor, its velocity, and direction. The encoder or resolver supplies signals to the motor controller, which helps the motor control gain accurate control.
5. **Housing:**
   - Though the entire assembly is enclosed, it is designed in such a way that internal parts of the assembly are well protected from the environment and mechanical force.
6. **Cooling Mechanism:**
   - In some cases, depending on the kind of motor used and where it is applied, it may contain a cooling system to reduce the system heat produced by the motor.

मुख्य घटक:

1. **स्टेटर:**
   - स्टेटर में दो वाइंडिंग होती हैं: मुख्य वाइंडिंग (स्थिर) और नियंत्रण वाइंडिंग (परिवर्तनीय)।
   - नियंत्रण वाइंडिंग गति और टॉर्क को नियंत्रित करने के लिए इनपुट वोल्टेज प्राप्त करती है।
   - स्टेटर मोटर का वह घटक है जो घूमता नहीं है और इसमें कॉइल शामिल होते हैं जो स्रोत से बिजली दिए जाने पर घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र बनाते हैं। मोटर के संचालन की गति स्टेटर के ध्रुवों की संख्या पर निर्भर करती है।
2. **रोटर:**
   - रोटर आमतौर पर गिलहरी पिंजरे प्रकार या ड्रैग-कप प्रकार (जड़ता को कम करने के लिए हल्का) होता है।
   - कुछ सर्वोमोटर बेहतर प्रदर्शन के लिए घाव वाले रोटर का उपयोग करते हैं। रोटर एक स्थायी चुंबक या एक क्षेत्र के साथ मोटर का घूर्णन घटक है, जो आमतौर पर विद्युत चुम्बकों से बना होता है। मोटर का काम इस विचार पर आधारित है कि रोटर स्टेटर के चुंबकीय क्षेत्र के साथ बातचीत के माध्यम से टॉर्क बनाता है।

3. शाफ्ट और बियरिंग्स:

- बियरिंग्स का उपयोग शाफ्ट, विशेष रूप से रोटर को सहारा देने के लिए किया जाता है, और वे घूर्णी गति के लिए कम घर्षण प्रदान करते हैं।
- शाफ्ट गति संचारित करता है, और उच्च परिशुद्धता वाले बियरिंग्स सुचारू संचालन सुनिश्चित करते हैं।

4. **फीडबैक मैकेनिज्म (टैकोमीटर/एनकोडर):**

- आधुनिक सर्वोमोटर्स में, एक एनकोडर या रिज़ॉल्वर सटीक गति नियंत्रण के लिए नियंत्रक को फीडबैक प्रदान करता है। यह उन महत्वपूर्ण विशेषताओं में से एक है जो मोटर की स्थिति, उसके वेग और दिशा को अपडेट करता है। एनकोडर या रिज़ॉल्वर मोटर नियंत्रक को सिग्नल प्रदान करता है, जो मोटर नियंत्रण को सटीक नियंत्रण प्राप्त करने में मदद करता है।

5. **आवास:**

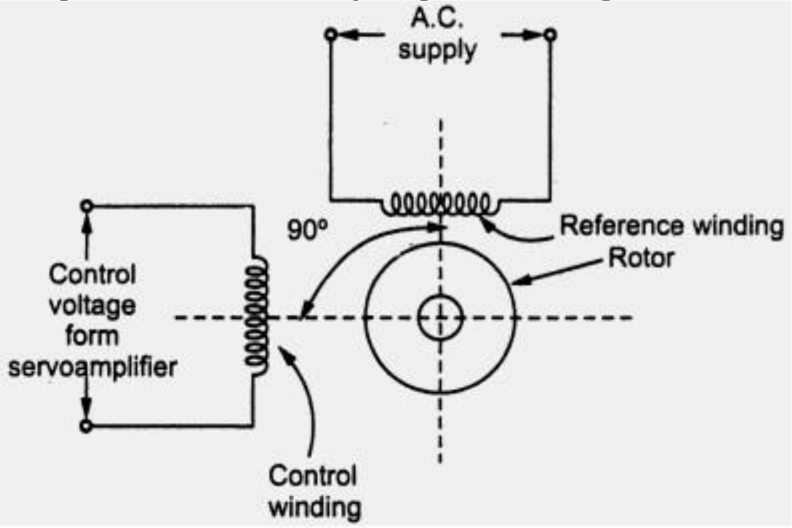
- हालाँकि पूरी असेंबली संलग्न है, लेकिन इसे इस तरह से डिज़ाइन किया गया है कि असेंबली के आंतरिक हिस्से पर्यावरण और यांत्रिक बल से अच्छी तरह से सुरक्षित हैं।

6. **शीतलन तंत्र:**

- कुछ मामलों में, उपयोग की जाने वाली मोटर के प्रकार और इसे कहाँ लगाया जाता है, इसके आधार पर, इसमें मोटर द्वारा उत्पादित सिस्टम गर्मी को कम करने के लिए शीतलन प्रणाली हो सकती है।

Construction of AC Servomotor:

Generally, an AC servo motor is a two-phase induction motor. This motor is constructed by using a stator and a rotor like a normal induction motor. Generally, the stator of this servo motor has a laminated structure. This stator includes two windings that are placed 90 degrees apart in space. Because of this phase variation, a rotary magnetic field is generated.

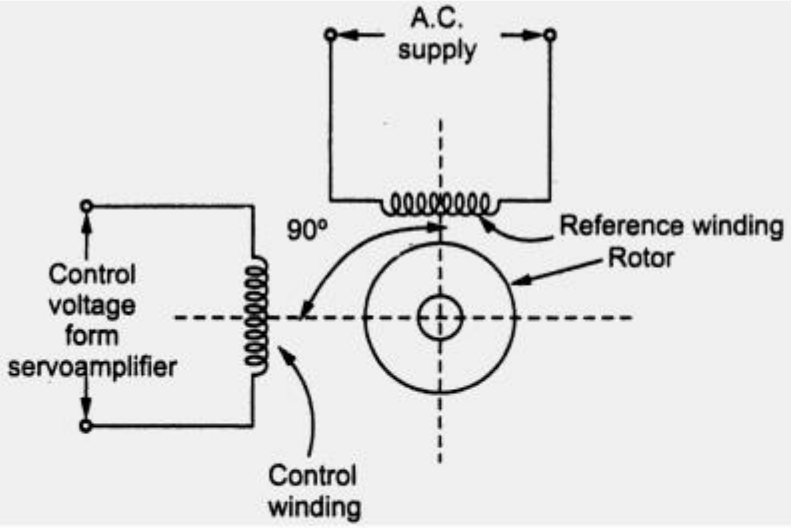


The first winding is known as the main winding or also known as fixed phase or reference winding. Here, the main winding is activated from the constant voltage supply source whereas the other winding like the control winding or control phase is activated by the variable control voltage. This control voltage is simply supplied from a servo amplifier.

Generally, the rotor is available in two types squirrel cage type & drag cup type. The rotor used in this motor is a normal cage-type rotor including aluminum bars fixed in slots & short-circuited through end rings. The air gap is kept minimum for maximum flux linking. The other type of rotor like a drag cup is mainly used where the inertia of the rotating system turns low. So this helps in decreasing power consumption.

एसी सर्वोमोटर का निर्माण:

आम तौर पर, एक एसी सर्वो मोटर एक दो-चरण प्रेरण मोटर है। इस मोटर का निर्माण एक सामान्य प्रेरण मोटर की तरह एक स्टेटर और एक रोटर का उपयोग करके किया जाता है। आम तौर पर, इस सर्वो मोटर के स्टेटर में एक लेमिनेटेड संरचना होती है। इस स्टेटर में दो वाइंडिंग शामिल हैं जो अंतरिक्ष में 90 डिग्री अलग-अलग रखी जाती हैं। इस चरण भिन्नता के कारण, एक रोटरी चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है।



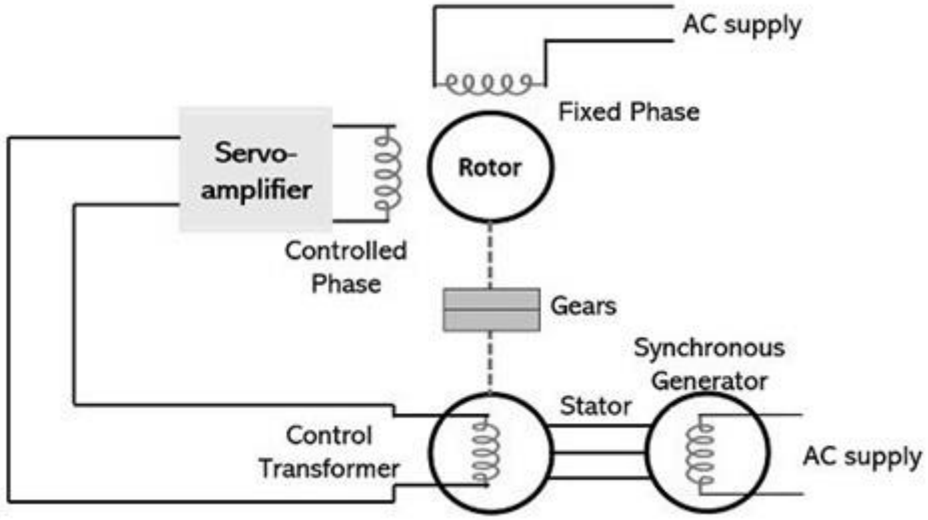
पहली वाइंडिंग को मुख्य वाइंडिंग के रूप में जाना जाता है या इसे फिक्स्ड फेज या रेफरेंस वाइंडिंग के रूप में भी जाना जाता है। यहां, मुख्य वाइंडिंग को निरंतर वोल्टेज आपूर्ति स्रोत से सक्रिय किया जाता है जबकि अन्य वाइंडिंग जैसे नियंत्रण वाइंडिंग या नियंत्रण चरण को परिवर्तनीय नियंत्रण वोल्टेज द्वारा सक्रिय किया जाता है। यह नियंत्रण वोल्टेज बस एक सर्वो एम्पलीफायर से आपूर्ति की जाती है।

आम तौर पर, रोटर दो प्रकारों में उपलब्ध होता है गिलहरी पिंजरे का प्रकार और ड्रैग कप प्रकार। इस मोटर में उपयोग किया जाने वाला रोटर एक सामान्य पिंजरे-प्रकार का रोटर है जिसमें स्लॉट में तय एल्यूमीनियम बार शामिल हैं और अंत के छल्ले के माध्यम से शॉर्ट-सर्किट किए गए हैं। अधिकतम फ्लक्स लिंकिंग के लिए एयर गैप को न्यूनतम रखा जाता है। ड्रैग कप

जैसे दूसरे प्रकार के रोटर का उपयोग मुख्य रूप से वहां किया जाता है जहां घूर्णन प्रणाली की जड़ता कम हो जाती है

Working Principle of AC Servomotor

The working principle of the ac servo motor is; firstly, a constant ac voltage is given at the stator's main winding of the servomotor and another stator terminal is connected simply to the control transformer throughout the control winding. Because of the applied reference voltage, the synchronous generator's shaft will rotate at a specific speed & obtains a certain angular position.

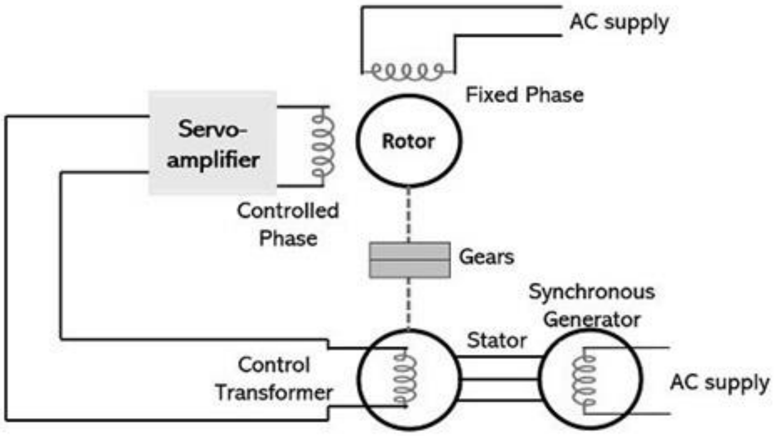


In addition, the control transformer's shaft has a specific angular position that is compared to the angular point of the synchro generator's shaft. So the two angular positions comparison will provide the error signal. More particularly, the levels of voltage for the equivalent shaft positions are evaluated which produces the error signal. So this error signal communicates with the present voltage level at the control transformer. After that, this signal is given to the servo amplifier so that it generates uneven control voltage.

By this applied voltage, again the rotor achieves a specific speed, starts revolution & maintains until the error signal value reaches zero so attaining the preferred position of the motor within the AC servomotors.

एसी सर्वोमोटर का कार्य सिद्धांत:

एसी सर्वो मोटर का कार्य सिद्धांत है; सबसे पहले, सर्वोमोटर के स्टेटर की मुख्य वाइंडिंग पर एक स्थिर एसी वोल्टेज दिया जाता है और एक अन्य स्टेटर टर्मिनल को कंट्रोल वाइंडिंग के माध्यम से कंट्रोल ट्रांसफॉर्मर से जोड़ा जाता है। लागू संदर्भ वोल्टेज के कारण, सिंक्रोनस जनरेटर का शाफ्ट एक विशिष्ट गति से घूमेगा और एक निश्चित कोणीय स्थिति प्राप्त करेगा।



इसके अलावा, नियंत्रण ट्रांसफार्मर के शाफ्ट में एक विशिष्ट कोणीय स्थिति होती है जिसकी तुलना सिंक्रो जनरेटर के शाफ्ट के कोणीय बिंदु से की जाती है। इसलिए दो कोणीय स्थितियों की तुलना त्रुटि संकेत प्रदान करेगी। अधिक विशेष रूप से, समतुल्य शाफ्ट स्थितियों के लिए वोल्टेज के स्तर का मूल्यांकन किया जाता है जो त्रुटि संकेत उत्पन्न करता है। तो यह त्रुटि संकेत नियंत्रण ट्रांसफार्मर पर वर्तमान वोल्टेज स्तर के साथ संचार करता है। उसके बाद, यह संकेत सर्वो एम्पलीफायर को दिया जाता है ताकि यह असमान नियंत्रण वोल्टेज उत्पन्न करे। इस लागू वोल्टेज से, फिर से रोटर एक विशिष्ट गति प्राप्त करता है, चक्कर लगाना शुरू करता है और तब तक बनाए रखता है जब तक कि त्रुटि संकेत मान शून्य तक नहीं पहुंच जाता है, इस प्रकार एसी सर्वोमोटर्स के भीतर मोटर की पसंदीदा स्थिति प्राप्त होती है।

Transfer Function of AC Servo Motor

Analyzing the control systems that involve the use of an AC servo motor requires comprehending the transfer function of this motor. The transfer function is the mathematical representation of the input-output characteristics of the system in the frequency domain.

In general, when dealing with power amplifiers or an AC servo motor, the transfer function is deduced based on the motor's electrical and mechanical properties. It ordinarily encompasses motor responsiveness such as resistance, inductance, as well as inertia and the characteristics of the feedback system. The transfer function also helps analyze the dynamic performance, stability, and ability of the motor to respond to controller signals.

एसी सर्वो मोटर का स्थानांतरण कार्य:

एसी सर्वो मोटर के उपयोग को शामिल करने वाली नियंत्रण प्रणालियों का विश्लेषण करने के लिए इस मोटर के स्थानांतरण कार्य को समझना आवश्यक है। स्थानांतरण कार्य आवृत्ति डोमेन में सिस्टम की इनपुट-आउटपुट विशेषताओं का गणितीय प्रतिनिधित्व है।

सामान्य तौर पर, पावर एम्पलीफायरों या एसी सर्वो मोटर से निपटने पर, मोटर के इलेक्ट्रिकल और मैकेनिकल गुणों के आधार पर स्थानांतरण कार्य का अनुमान लगाया जाता है। इसमें आमतौर पर प्रतिरोध, प्रेरण, साथ ही जड़ता और प्रतिक्रिया प्रणाली की विशेषताओं जैसे मोटर प्रतिक्रियाशीलता शामिल होती है। स्थानांतरण कार्य नियंत्रक संकेतों पर प्रतिक्रिया करने के लिए मोटर के गतिशील प्रदर्शन, स्थिरता और क्षमता का विश्लेषण करने में भी मदद करता है।

Characteristics of AC Servo Motor

As much as an AC servo motor is a highly specialized product, its application is favored by enhanced motion control in practical use. Some key characteristics include:

- **High Torque at Low Speed:** AC servo motors are able to develop high torque throughout the low-speed range and, therefore, will not degrade inside momentum and constantly needed force.
- **Precision and Accuracy:** The feedback mechanism enables precise control of the motor position speed and acceleration, reducing errors and variance.
- **Smooth Operation:** Since the sinusoidal back EMF and the closed loop system are used, the operation is smooth, perfect, and vibration-free.
- **Wide Speed Range:** AC servo motors are usable at high speeds, and performance does not degrade over low speeds; hence, they are useful in various applications.
- **Quick Response:** A closed-loop feedback system enables one to control the motor in real time, hence enabling a very fast response to the motion.
- **Low Inertia:** AC servo motors normally have low rotor inertia, which means they must accelerate and decelerate quickly, which is so relevant in dynamic types of applications.

एसी सर्वो मोटर की विशेषताएँ

एसी सर्वो मोटर एक अत्यधिक विशिष्ट उत्पाद है, लेकिन व्यावहारिक उपयोग में इसके अनुप्रयोग को बेहतर गति नियंत्रण द्वारा बढ़ावा दिया जाता है। कुछ प्रमुख विशेषताओं में शामिल हैं:

- **कम गति पर उच्च टॉर्क:** एसी सर्वो मोटर कम गति सीमा में उच्च टॉर्क विकसित करने में सक्षम हैं और इसलिए, अंदर की गति और लगातार आवश्यक बल में कमी नहीं आएगी।
- **परिशुद्धता और सटीकता:** फीडबैक तंत्र मोटर की स्थिति गति और त्वरण के सटीक नियंत्रण को सक्षम बनाता है, जिससे त्रुटियाँ और भिन्नता कम होती है।

- **सुचारू संचालन:** चूँकि साइनसॉइडल बैक EMF और बंद लूप सिस्टम का उपयोग किया जाता है, इसलिए संचालन सुचारू, सही और कंपन-मुक्त होता है।
- **विस्तृत गति सीमा:** एसी सर्वो मोटर उच्च गति पर उपयोग करने योग्य हैं, और कम गति पर प्रदर्शन में कमी नहीं आती है; इसलिए, वे विभिन्न अनुप्रयोगों में उपयोगी हैं।
- **त्वरित प्रतिक्रिया:** एक बंद-लूप फीडबैक सिस्टम किसी को वास्तविक समय में मोटर को नियंत्रित करने में सक्षम बनाता है, इसलिए गति के लिए बहुत तेज़ प्रतिक्रिया सक्षम करता है।
- **कम जड़त्व:** एसी सर्वो मोटर में सामान्यतः रोटर जड़त्व कम होता है, जिसका अर्थ है कि उन्हें शीघ्रता से गति और मंदन करना चाहिए, जो कि गतिशील प्रकार के अनुप्रयोगों में बहुत प्रासंगिक है।

Advantages of AC Servo Motor

The main advantages of AC servo motors make this component highly useful in contemporary automation and control systems. Some of the key advantages include:

- **High Efficiency:** AC servo motors are developed to remain highly efficient and to transform a vast amount of electrical and mechanical energy, thus consuming less energy.
- **Precise Control**: A closed-loop feedback system also makes it possible to control position, speed, and acceleration, and as a result, the performance is well controlled.
- **Versatility:** AC servo motors can be applied to almost all fields, such as robotics, CNC machines, appliances, etc. because they have high applicability and a large speed range.
- **Reliability:** AC servo motors are very dependable because of the rigid structure and sophisticated control circuits, which are easy to maintain and have a long service life.

एसी सर्वो मोटर के लाभ

एसी सर्वो मोटर के मुख्य लाभ इस घटक को समकालीन स्वचालन और नियंत्रण प्रणालियों में अत्यधिक उपयोगी बनाते हैं। कुछ प्रमुख लाभों में शामिल हैं:

- **उच्च दक्षता:** एसी सर्वो मोटर अत्यधिक कुशल बने रहने और बड़ी मात्रा में विद्युत और यांत्रिक ऊर्जा को बदलने के लिए विकसित किए गए हैं, इस प्रकार कम ऊर्जा की खपत करते हैं।
- **सटीक नियंत्रण:** एक बंद-लूप फीडबैक सिस्टम भी स्थिति, गति और त्वरण को नियंत्रित करना संभव बनाता है, और परिणामस्वरूप, प्रदर्शन अच्छी तरह से नियंत्रित होता है।
- **बहुमुखी प्रतिभा:** एसी सर्वो मोटर्स को लगभग सभी क्षेत्रों में लागू किया जा सकता है, जैसे कि रोबोटिक्स, सीएनसी मशीन, उपकरण, आदि क्योंकि उनकी उच्च प्रयोज्यता और एक बड़ी गति सीमा होती है।
- **विश्वसनीयता:** एसी सर्वो मोटर्स कठोर संरचना और परिष्कृत नियंत्रण सर्किट के कारण बहुत भरोसेमंद हैं, जिन्हें बनाए रखना आसान है और उनकी सेवा का जीवन लंबा है।

Disadvantages

- For precise motion control, AC servo motors require additional control systems and have a more complex design.
- The use of more complex control systems, like amplifiers and feedback mechanisms, is required when using AC servo motors.
- The feedback components of AC servo motors are subject to wear and tear namely resolvers and encoders.
- Noise is produced while operating if proper wiring guidelines aren't followed.
- AC servo motors may use more power than regular AC motors when they are working faster or with larger loads.

नुकसान

- सटीक गति नियंत्रण के लिए, AC सर्वो मोटर को अतिरिक्त नियंत्रण प्रणालियों की आवश्यकता होती है और इनका डिज़ाइन अधिक जटिल होता है।
- AC सर्वो मोटर का उपयोग करते समय एम्पलीफायर और फीडबैक तंत्र जैसी अधिक जटिल नियंत्रण प्रणालियों का उपयोग आवश्यक होता है।
- AC सर्वो मोटर के फीडबैक घटक जैसे रिज़ॉल्वर और एनकोडर टूट-फूट के अधीन होते हैं।
- यदि उचित वायरिंग दिशा-निर्देशों का पालन नहीं किया जाता है, तो संचालन के दौरान शोर उत्पन्न होता है।
- AC सर्वो मोटर नियमित AC मोटर की तुलना में अधिक शक्ति का उपयोग कर सकते हैं जब वे तेज़ी से या बड़े भार के साथ काम कर रहे हों।

AC Servo Motor Applications

The applications of AC servo motors are numerous, covering almost all fields in technology and all sectors of industry. Some common applications include:

- **Robotics:** AC servo motors are widely adopted in robotics for the purpose of controlling the degrees of freedom in joints or actuators, thus making robots perform very specific tasks with precise movements.
- **CNC Machines:** The products under this category include computer numerical control (CNC) machines in which AC servo motors are used to drive cutting tools that accurately machine materials.
- **Automation Systems:** In a conveyor system, AC servo motors, robots, or any other apparatus act as controllers of the conveyor, as well as for the smooth running of the plant.

- **Aerospace:** In the aerospace industry, AC servo motors are employed in the control systems of aircraft and spacecraft to manage the major parts with exactitude.
- **Medical Equipment:** Medical-related appliances like Magnetic Resonance Imaging (MRI) equipment, surgical Robots, and Infusion pumps also need AC servo motors due to their accuracy and effectiveness.

एसी सर्वो मोटर अनुप्रयोग

एसी सर्वो मोटर्स के अनुप्रयोग बहुत सारे हैं, जो प्रौद्योगिकी के लगभग सभी क्षेत्रों और उद्योग के सभी क्षेत्रों को कवर करते हैं। कुछ सामान्य अनुप्रयोगों में शामिल हैं:

- **रोबोटिक्स:** एसी सर्वो मोटर्स को रोबोटिक्स में जोड़ों या एक्ट्यूएटर्स में स्वतंत्रता की डिग्री को नियंत्रित करने के उद्देश्य से व्यापक रूप से अपनाया जाता है, जिससे रोबोट सटीक आंदोलनों के साथ बहुत विशिष्ट कार्य कर सकते हैं।
- **सीएनसी मशीनें:** इस श्रेणी के उत्पादों में कंप्यूटर संख्यात्मक नियंत्रण (सीएनसी) मशीनें शामिल हैं जिनमें एसी सर्वो मोटर्स का उपयोग कटिंग टूल्स को चलाने के लिए किया जाता है जो सटीक रूप से मशीन सामग्री बनाते हैं।
- **स्वचालन प्रणाली:** एक कन्वेयर सिस्टम में, एसी सर्वो मोटर्स, रोबोट या कोई अन्य उपकरण कन्वेयर के नियंत्रक के रूप में कार्य करते हैं, साथ ही साथ संयंत्र के सुचारू संचालन के लिए भी।
- **एयरोस्पेस:** एयरोस्पेस उद्योग में, एसी सर्वो मोटर्स को विमान और अंतरिक्ष यान के नियंत्रण प्रणालियों में प्रमुख भागों को सटीकता के साथ प्रबंधित करने के लिए नियोजित किया जाता है।
- **चिकित्सा उपकरण:** चुंबकीय अनुनाद इमेजिंग (एमआरआई) उपकरण, सर्जिकल रोबोट और इन्फ्यूजन पंप जैसे चिकित्सा संबंधी उपकरणों को भी उनकी सटीकता और प्रभावशीलता के कारण एसी सर्वो मोटर्स की आवश्यकता होती है।

Construction, working and concept of synchronous motor:

Definition: The motor which runs at synchronous speed is known as the synchronous motor. The synchronous speed is the constant speed at which the motor generates the **electromotive force**. The synchronous motor is used for converting the electrical energy into mechanical energy.

A synchronous motor is an alternating current (AC) motor that operates at a constant speed, known as synchronous speed, which is directly proportional to the frequency of the supply current and inversely proportional to the number of poles of the motor. The rotor of a synchronous motor rotates at the same speed as the rotating magnetic field produced by the stator, hence the term "synchronous."

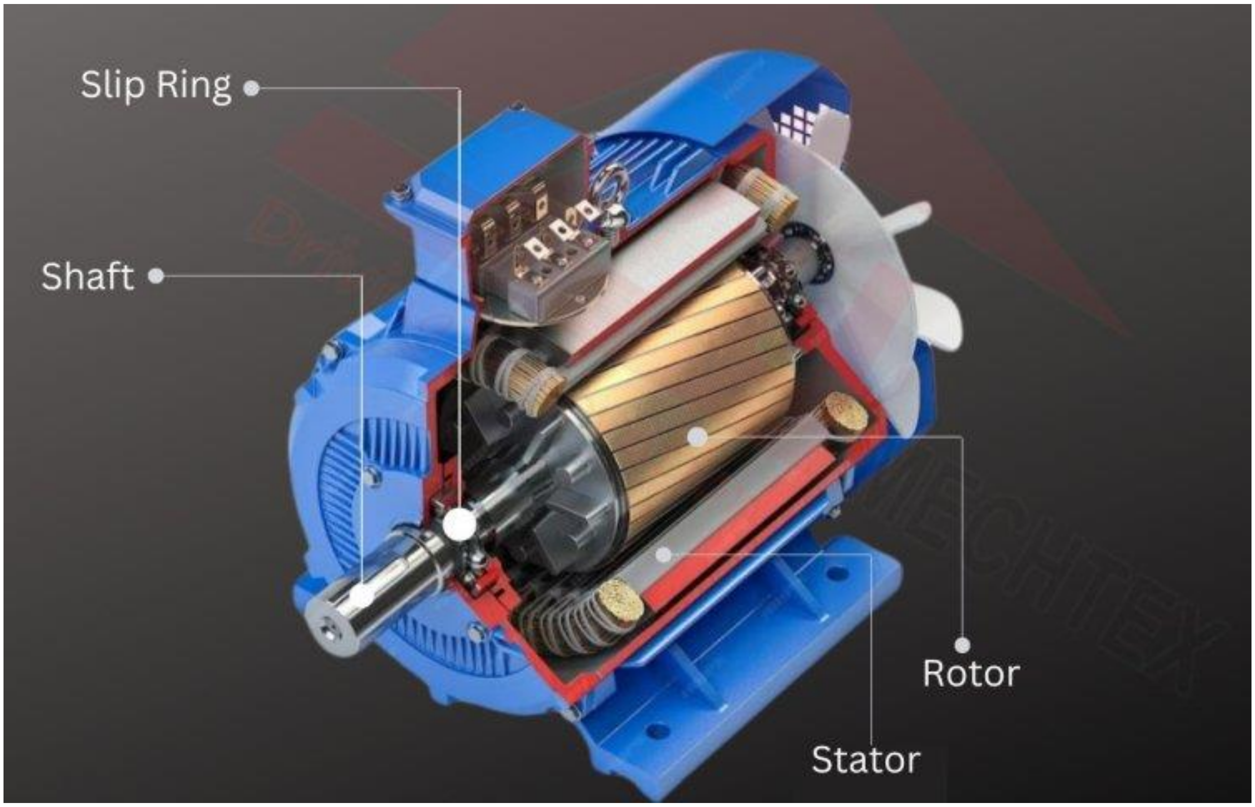
सिंक्रोनस मोटर का निर्माण, कार्य और अवधारणा:

परिभाषा: सिंक्रोनस गति से चलने वाली मोटर को सिंक्रोनस मोटर के रूप में जाना जाता है। सिंक्रोनस गति वह स्थिर गति है जिस पर मोटर विद्युत चालक बल उत्पन्न करती है। सिंक्रोनस मोटर का उपयोग विद्युत ऊर्जा को यांत्रिक ऊर्जा में परिवर्तित करने के लिए किया जाता है।

सिंक्रोनस मोटर एक प्रत्यावर्ती धारा (एसी) मोटर है जो एक स्थिर गति से संचालित होती है, जिसे सिंक्रोनस गति के रूप में जाना जाता है, जो आपूर्ति धारा की आवृत्ति के सीधे आनुपातिक और मोटर के ध्रुवों की संख्या के व्युत्क्रमानुपाती होती है। एक सिंक्रोनस मोटर का रोटर स्टेटर द्वारा उत्पादित घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र के समान गति से घूमता है, इसलिए "सिंक्रोनस" शब्द का प्रयोग किया जाता है।

Construction of Synchronous Motor:

A **synchronous motor** is an AC motor in which the rotor rotates at the same speed as the synchronous speed of the stator's rotating magnetic field. It consists of the following main parts:



(a) Stator:

- The stator is the stationary part of the motor.
- It consists of a laminated core with slots for three-phase winding.
- The three-phase winding is energized with an AC supply to produce a rotating magnetic field.

(b) Rotor:

- The rotor is the rotating part of the motor.
- It consists of a field winding mounted on a laminated iron core.
- The field winding is energized by a **DC supply** through slip rings and brushes (in the case of a wound rotor) or permanent magnets (in the case of a permanent magnet synchronous motor).
- The rotor can be either:
  - **Salient Pole Rotor** (used for low-speed applications).
  - **Cylindrical Rotor** (used for high-speed applications).

(c) Excitation System:

- A DC supply is provided to the rotor winding to produce a magnetic field.
- This supply is called "excitation" and can be provided using external DC sources like batteries or exciters.

(d) Bearings and Frame:

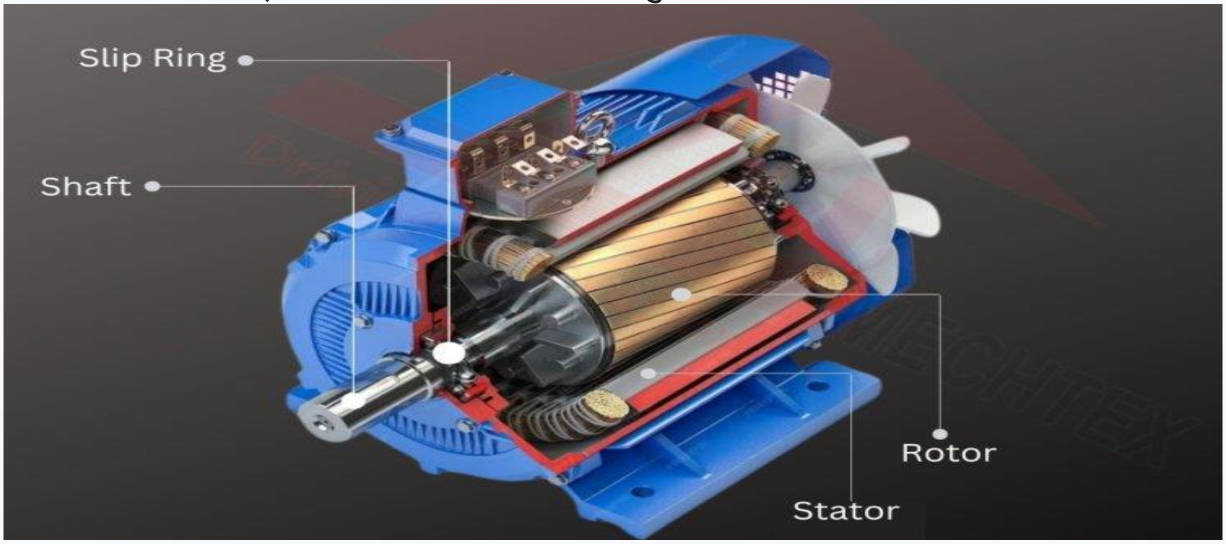
- Bearings support the rotor and allow smooth rotation.
- The frame encloses the motor and provides structural support.

(e) Slip-rings and brushes:

- There are two slip-rings made of phosphor bronze fitted on the shaft.
- Two carbon brushes are kept touching the slip-ring via this arrangement, the rotor is fed by DC obtained from the rotating exciter.

सिंक्रोनस मोटर का निर्माण:

सिंक्रोनस मोटर एक एसी मोटर है जिसमें रोटर स्टेटर के घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र की सिंक्रोनस गति के समान गति से घूमता है। इसमें निम्नलिखित मुख्य भाग होते हैं:



(ए) स्टेटर:

• स्टेटर मोटर का स्थिर हिस्सा है।

• इसमें तीन-चरण वाइंडिंग के लिए स्लॉट के साथ एक लेमिनेटेड कोर होता है।

• तीन-चरण वाइंडिंग को एक घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र का उत्पादन करने के लिए एसी आपूर्ति के साथ सक्रिय किया जाता है।

(बी) रोटर:

• रोटर मोटर का घूमने वाला हिस्सा है।

• इसमें एक लेमिनेटेड लोहे के कोर पर लगा एक फील्ड वाइंडिंग होता है।

• फील्ड वाइंडिंग को स्लिप रिंग और ब्रश (एक घाव रोटर के मामले में) या स्थायी चुंबक (एक स्थायी चुंबक तुल्यकालिक मोटर के मामले में) के माध्यम से डीसी आपूर्ति द्वारा सक्रिय किया जाता है।

• रोटर या तो हो सकता है:

o मुख्य ध्रुव रोटर (कम गति वाले अनुप्रयोगों के लिए उपयोग किया जाता है)।

o बेलनाकार रोटर (उच्च गति वाले अनुप्रयोगों के लिए उपयोग किया जाता है)।

(सी) उत्तेजना प्रणाली:

• चुंबकीय क्षेत्र का उत्पादन करने के लिए रोटर वाइंडिंग को एक डीसी आपूर्ति प्रदान की जाती है। • इस आपूर्ति को "उत्तेजना" कहा जाता है और इसे बैटरी या उत्तेजक जैसे बाहरी डीसी स्रोतों का उपयोग करके प्रदान किया जा सकता है।

(घ) बियरिंग और फ्रेम:

• बियरिंग रोटर को सहारा देते हैं और सुचारू रूप से घूमने देते हैं।

• फ़्रेम मोटर को घेरता है और संरचनात्मक सहायता प्रदान करता है।

(ङ) स्लिप-रिंग और ब्रश:

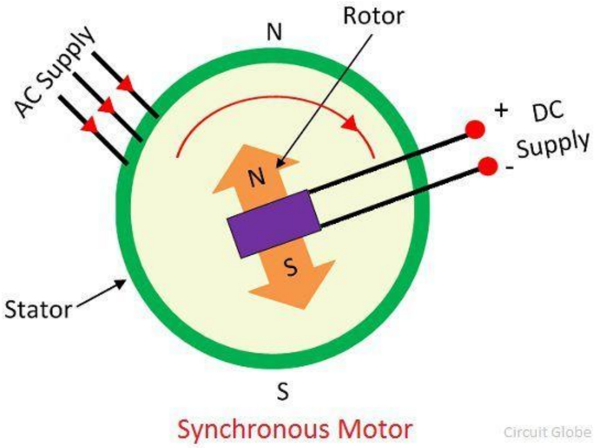
• शाफ्ट पर फ़ॉस्फ़र कांस्य से बने दो स्लिप-रिंग लगे होते हैं।

• इस व्यवस्था के ज़रिए दो कार्बन ब्रश स्लिप-रिंग को छूते रहते हैं, रोटर को रोटेटिंग उत्तेजक से प्राप्त डीसी द्वारा फ़ीड किया जाता है।

Working Principle of Synchronous Motor:

A synchronous motor is a type of AC motor that works on the principle of electromagnetic fields. The working of a synchronous motor is divided into three stages: excitation, synchronization, and steady-state operation.

When a 3-phase supply is connected to the stator winding, a rotating magnetic field is produced by the stator. It rotates at a synchronous speed. Exciter produces DC voltage which is supplied through brushes and slip-rings to the field winding of the rotor. Thus rotor poles are formed.



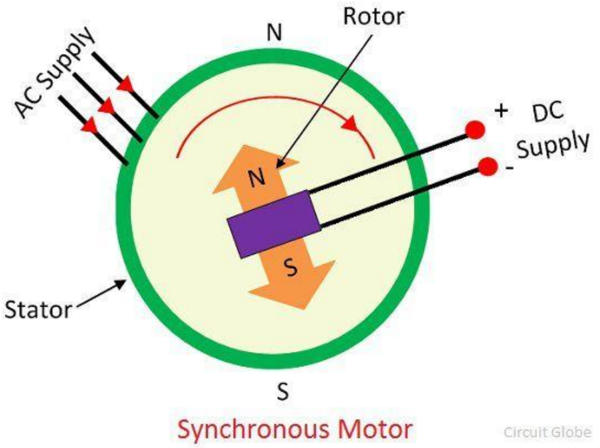
Similar poles try to repel each other and hence rotor poles are repelled by stator poles and the rotor tries to rotate in an anti-clockwise direction. Now, as the stator poles are also changing their position (rotating field), after the half revolution, the upper part of the stator will form an S pole and the N pole will be at the bottom. Meanwhile, the rotor's N pole reaches up to the bottom.

Since the stator N pole is formed at the bottom, there is a force of repulsion and the rotor tries to rotate in a clockwise direction. Again after the half revolution, the stator poles will change their position and the rotor will try to rotate in an anticlockwise direction. Due to the inertia of the rotor, the rotor will not rotate at all. There is no unidirectional torque and hence the synchronous motor is not self-starting.

सिंक्रोनस मोटर का कार्य सिद्धांत:

सिंक्रोनस मोटर एक प्रकार की एसी मोटर है जो विद्युत चुम्बकीय क्षेत्रों के सिद्धांत पर काम करती है। सिंक्रोनस मोटर का काम तीन चरणों में विभाजित है: उत्तेजना, तुल्यकालन और स्थिर-अवस्था संचालन।

जब स्टेटर वाइंडिंग से 3-चरण की आपूर्ति जुड़ी होती है, तो स्टेटर द्वारा एक घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है। यह एक तुल्यकालिक गति से घूमता है। एक्साइटर डीसी वोल्टेज उत्पन्न करता है जिसे ब्रश और स्लिप-रिंग के माध्यम से रोटर की फील्ड वाइंडिंग में आपूर्ति की जाती है। इस प्रकार रोटर पोल बनते हैं।



समान ध्रुव एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करने का प्रयास करते हैं और इसलिए रोटर ध्रुव स्टेटर ध्रुवों द्वारा प्रतिकर्षित होते हैं और रोटर वामावर्त दिशा में घूमने का प्रयास करता है। अब, चूंकि स्टेटर ध्रुव भी अपनी स्थिति (घूर्णन क्षेत्र) बदल रहे हैं, आधे चक्कर के बाद स्टेटर का ऊपरी भाग S ध्रुव बनाएगा और N ध्रुव नीचे होगा। इस बीच, रोटर का N ध्रुव नीचे तक पहुंच जाता है।

चूंकि स्टेटर N ध्रुव नीचे बनता है, इसलिए प्रतिकर्षण बल लगता है और रोटर दक्षिणावर्त दिशा में घूमने का प्रयास करता है। फिर से आधे चक्कर के बाद स्टेटर ध्रुव अपनी स्थिति बदल देंगे और रोटर वामावर्त दिशा में घूमने का प्रयास करेगा। रोटर के जड़त्व के कारण रोटर बिल्कुल भी नहीं घूमेगा

Advantages of Synchronous Motor

1. It can be operated at any desired power factor (unity, leading, or lagging) by changing excitation.
2. It can be used for power factor correction.
3. It can be constructed with air gaps that are wider than that in induction motors. This makes it more stable mechanically.
4. Electromagnetic power varies linearly with the voltage in such motors.
5. It offers higher efficiency, usually more than 90%, in the case of low-speed and unity power factor applications.

सिंक्रोनस मोटर के लाभ

1. इसे उत्तेजना में परिवर्तन करके किसी भी वांछित पावर फैक्टर (यूनिटी, लीडिंग या लैगिंग) पर संचालित किया जा सकता है।

2. इसका उपयोग पावर फैक्टर सुधार के लिए किया जा सकता है।

3. इसे ऐसे एयर गैप के साथ बनाया जा सकता है जो इंडक्शन मोटर्स की तुलना में अधिक चौड़े होते हैं। यह इसे यांत्रिक रूप से अधिक स्थिर बनाता है।

4. विद्युत चुम्बकीय शक्ति ऐसी मोटरों में वोल्टेज के साथ रैखिक रूप से बदलती रहती है।

5. यह कम गति और यूनिटी पावर फैक्टर अनुप्रयोगों के मामले में उच्च दक्षता, आमतौर पर 90% से अधिक प्रदान करता है।

Disadvantages of Synchronous Motor

1. Since there is no unidirectional torque, it is not self-starting.
2. It requires frequent maintenance.
3. An external DC source is required to provide excitation.
4. It required additional damper windings.
5. Hunting (surging or phase swinging) occurs if there is a sudden change in load.

सिंक्रोनस मोटर के नुकसान

1. चूँकि इसमें कोई यूनिडायरेक्शनल टॉर्क नहीं होता, इसलिए यह सेल्फ-स्टार्ट नहीं होता।

2. इसे लगातार रखरखाव की आवश्यकता होती है।

3. उत्तेजना प्रदान करने के लिए एक बाहरी डीसी स्रोत की आवश्यकता होती है।
4. इसके लिए अतिरिक्त डैम्पर वाइंडिंग की आवश्यकता होती है।
5. लोड में अचानक बदलाव होने पर हंटिंग (सर्जिंग या फेज स्विंगिंग) होती है।

Application of Synchronous Motor

Synchronous motors find applications across various sectors due to their efficiency and ability to operate at constant speed.

- Synchronous motors are extensively used in industries for driving continuous process machines like pumps, compressors, conveyor belts, and fans, where speed regulation is critical.
- In the power generation industry, synchronous motors serve as synchronous condensers for power factor correction purposes. Additionally, they play pivotal roles in precision applications such as in synchronizing clocks and in robotics.
- Their capability to work under a range of power factors and their robust performance make synchronous motors suitable for heavy-duty applications, enhancing efficiency and operational reliability in numerous industrial processes.

सिंक्रोनस मोटर का अनुप्रयोग

सिंक्रोनस मोटर अपनी दक्षता और निरंतर गति से संचालित करने की क्षमता के कारण विभिन्न क्षेत्रों में अनुप्रयोग पाते हैं।

- सिंक्रोनस मोटर का उपयोग उद्योगों में पंप, कंप्रेसर, कन्वेयर बेल्ट और पंखे जैसी निरंतर प्रक्रिया मशीनों को चलाने के लिए बड़े पैमाने पर किया जाता है, जहाँ गति विनियमन महत्वपूर्ण है।
- बिजली उत्पादन उद्योग में, सिंक्रोनस मोटर पावर फैक्टर सुधार उद्देश्यों के लिए सिंक्रोनस कंडेनसर के रूप में काम करते हैं। इसके अतिरिक्त, वे घड़ियों को सिंक्रोनाइज़ करने और रोबोटिक्स जैसे सटीक अनुप्रयोगों में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।
- कई पावर फैक्टर के तहत काम करने की उनकी क्षमता और उनका मजबूत प्रदर्शन सिंक्रोनस मोटर को भारी-भरकम अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त बनाता है, जिससे कई औद्योगिक प्रक्रियाओं में दक्षता और परिचालन विश्वसनीयता बढ़ती है।

Construction, working and concept of stepper motor:

What is a Stepper Motor?

A ***stepper motor*** is a brushless electromechanical device that converts a series of electric pulses applied to its excitation windings into precisely defined, step-by-step mechanical shaft rotations. The motor's shaft rotates through a fixed angle for each discrete pulse, with this rotation being either linear or angular. A single pulse input results in a one-step movement.

The angle through which the stepper motor shaft turns for each pulse is known as the step angle, typically expressed in degrees.

The number of input pulses given to the motor decides the step angle and hence the position of motor shaft is controlled by controlling the number of pulses. This unique feature makes the stepper motor to be well suitable for open-loop control system wherein the precise position of the shaft is maintained with exact number of pulses without using a feedback sensor.

If the step angle is smaller, the greater will be the number of steps per revolutions and higher will be the accuracy of the position obtained. The step angles can be as large as 90 degrees and as small as 0.72 degrees, however, the commonly used step angles are 1.8 degrees, 2.5 degrees, 7.5 degrees and 15 degrees.

स्टेपर मोटर का निर्माण, कार्य और अवधारणा:

स्टेपर मोटर क्या है?

स्टेपर मोटर एक ब्रशलेस इलेक्ट्रोमैकेनिकल डिवाइस है जो अपने उत्तेजना वाइंडिंग पर लागू विद्युत पल्स की एक श्रृंखला को सटीक रूप से परिभाषित, चरण-दर-चरण यांत्रिक शाफ्ट घुमाव में परिवर्तित करता है। मोटर का शाफ्ट प्रत्येक असतत पल्स के लिए एक निश्चित कोण से घूमता है, यह घुमाव या तो रैखिक या कोणीय होता है। एक एकल पल्स इनपुट के परिणामस्वरूप एक-चरणीय गति होती है।

प्रत्येक पल्स के लिए स्टेपर मोटर शाफ्ट जिस कोण से घूमता है उसे स्टेप एंगल के रूप में जाना जाता है, जिसे आमतौर पर डिग्री में व्यक्त किया जाता है।

मोटर को दिए गए इनपुट पल्स की संख्या स्टेप एंगल तय करती है और इसलिए पल्स की संख्या को नियंत्रित करके मोटर शाफ्ट की स्थिति को नियंत्रित किया जाता है। यह अनूठी विशेषता स्टेपर मोटर को ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टम के लिए उपयुक्त बनाती है, जिसमें फीडबैक सेंसर का उपयोग किए बिना पल्स की सटीक संख्या के साथ शाफ्ट की सटीक स्थिति बनाए रखी जाती है।

यदि स्टेप एंगल छोटा है, तो प्रति चक्कर चरणों की संख्या अधिक होगी और प्राप्त स्थिति की सटीकता अधिक होगी। स्टेप एंगल 90 डिग्री जितना बड़ा और 0.72 डिग्री जितना छोटा हो सकता है, हालांकि, आमतौर पर इस्तेमाल किए जाने वाले स्टेप एंगल 1.8 डिग्री, 2.5 डिग्री, 7.5 डिग्री और 15 डिग्री हैं।

Construction of Stepper Motor:

A stepper motor consists of two main parts:

(a) Stator (Stationary Part)

- The stator has multiple electromagnet coils arranged in a circular pattern.
- When pulses of current are applied to these coils in a specific sequence, **a** rotating magnetic field **is** produced.
- The stator winding can be arranged in **bipolar** or unipolar configurations:
  - **Unipolar Stepper Motor**: Each phase has a center tap, allowing simpler control.
  - **Bipolar Stepper Motor**: Requires an H-bridge circuit for direction control.

(b) Rotor (Rotating Part)

- The rotor is made of permanent magnets or a soft iron core with teeth**.**
- The rotor aligns with the stator's magnetic field when energized.
- There are **two types of rotors**:
  1. **Permanent Magnet Rotor** – Uses a magnetized rotor for precise positioning.
  2. **Variable Reluctance Rotor** – Uses a non-magnetized rotor with teeth that align with the stator.
  3. **Hybrid Rotor** – Combines both permanent magnet and reluctance properties for high precision.

स्टेपर मोटर का निर्माण:

स्टेपर मोटर में दो मुख्य भाग होते हैं:

(ए) स्टेटर (स्थिर भाग)

- स्टेटर में एक गोलाकार पैटर्न में व्यवस्थित कई इलेक्ट्रोमैग्नेट कॉइल होते हैं।
- जब इन कॉइल पर एक विशिष्ट क्रम में करंट की पल्स लगाई जाती है, तो एक घूर्णन चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है।
- स्टेटर वाइंडिंग को द्विध्रुवीय या एकध्रुवीय विन्यास में व्यवस्थित किया जा सकता है:
- एकध्रुवीय स्टेपर मोटर: प्रत्येक चरण में एक केंद्र टैप होता है, जो सरल नियंत्रण की अनुमति देता है।
- द्विध्रुवीय स्टेपर मोटर: दिशा नियंत्रण के लिए एच-ब्रिज सर्किट की आवश्यकता होती है।

(बी) रोटर (घूमने वाला भाग)

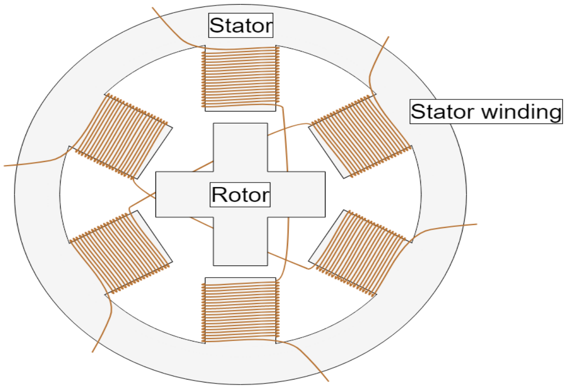
- रोटर स्थायी चुंबक या दांतों के साथ एक नरम लोहे के कोर से बना होता है।

- रोटर सक्रिय होने पर स्टेटर के चुंबकीय क्षेत्र के साथ संरेखित होता है।
- रोटर दो प्रकार के होते हैं:

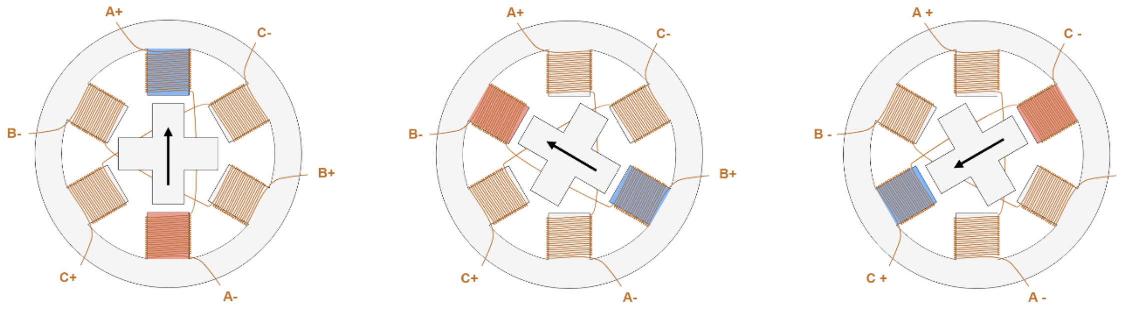
1. स्थायी चुंबक रोटर - सटीक स्थिति के लिए एक चुंबकीय रोटर का उपयोग करता है।
2. परिवर्तनीय अनिच्छा रोटर - स्टेटर के साथ संरेखित दांतों के साथ एक गैर-चुंबकीय रोटर का उपयोग करता है।
3. हाइब्रिड रोटर - उच्च परिशुद्धता के लिए स्थायी चुंबक और अनिच्छा दोनों गुणों को जोड़ता है।

Stepper Motor Working Principles

As all with electric motors, stepper motors have a stationary part (the stator) and a moving part (the rotor). On the stator, there are teeth on which coils are wired, while the rotor is either a permanent magnet or a variable reluctance iron core. We will dive deeper into the different rotor structures later. Figure shows a drawing representing the section of the motor is shown, where the rotor is a variable-reluctance iron core.

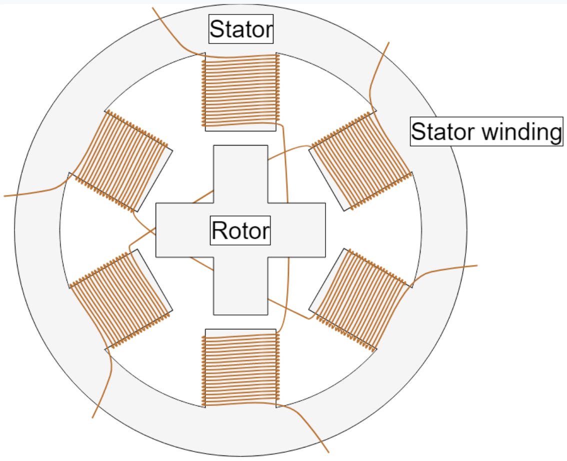


The basic working principle of the stepper motor is the following: By energizing one or more of the stator phases, a magnetic field is generated by the current flowing in the coil and the rotor aligns with this field. By supplying different phases in sequence, the rotor can be rotated by a specific amount to reach the desired final position. Figure shows a representation of the working principle. At the beginning, coil A is energized and the rotor is aligned with the magnetic field it produces. When coil B is energized, the rotor rotates clockwise by 60° to align with the new magnetic field. The same happens when coil C is energized. In the pictures, the colors of the stator teeth indicate the direction of the magnetic field generated by the stator winding.

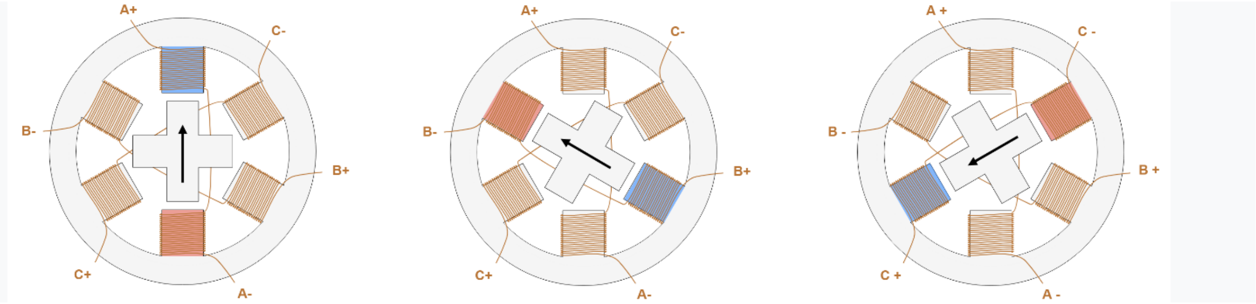


स्टेपर मोटर कार्य सिद्धांत

सभी इलेक्ट्रिक मोटरों की तरह, स्टेपर मोटर में भी एक स्थिर भाग (स्टेटर) और एक गतिशील भाग (रोटर) होता है। स्टेटर पर, दांत होते हैं जिन पर कॉइल वायर्ड होते हैं, जबकि रोटर या तो एक स्थायी चुंबक या एक परिवर्तनीय अनिच्छा लोहे का कोर होता है। हम बाद में विभिन्न रोटर संरचनाओं में गहराई से उतरेंगे। चित्र में मोटर के उस भाग का चित्रण दिखाया गया है, जहाँ रोटर एक परिवर्तनीय-अनिच्छा लोहे का कोर है।



स्टेपर मोटर का मूल कार्य सिद्धांत निम्नलिखित है: स्टेटर के एक या अधिक चरणों को सक्रिय करके, कुंडली में प्रवाहित धारा द्वारा एक चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है और रोटर इस क्षेत्र के साथ संरेखित होता है। क्रम में विभिन्न चरणों की आपूर्ति करके, रोटर को वांछित अंतिम स्थिति तक पहुँचने के लिए एक विशिष्ट मात्रा में घुमाया जा सकता है। चित्र कार्य सिद्धांत का एक प्रतिनिधित्व दिखाता है। शुरुआत में, कुंडली A को सक्रिय किया जाता है और रोटर को उसके द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र के साथ संरेखित किया जाता है। जब कुंडली B को सक्रिय किया जाता है, तो रोटर नए चुंबकीय क्षेत्र के साथ संरेखित करने के लिए 60° दक्षिणावर्त घूमता है। कुंडली C को सक्रिय करने पर भी यही होता है। चित्रों में, स्टेटर के दांतों के रंग स्टेटर वाइंडिंग द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र की दिशा को इंगित करते हैं।



Advantages of Stepper Motor

Some key advantages of using stepper motors include:

- Precise positioning over full or part rotation with high resolution.
- Excellent speed and position control in open loop systems without feedback devices.
- Ability to start, stop and operate at constant angular velocity with high degree of precision.
- Hold their position efficiently without power due to highly detented nature.
- Easy control using pulses which makes programming simpler.
- Less maintenance required as there are no brushes.
- Suitable for applications like CNC machines where position must be accurately controlled.

स्टेपर मोटर के लाभ

स्टेपर मोटर्स के उपयोग के कुछ प्रमुख लाभों में शामिल हैं:

- उच्च रिज़ॉल्यूशन के साथ पूर्ण या आंशिक रोटेशन पर सटीक स्थिति निर्धारण।
- फीडबैक डिवाइस के बिना ओपन लूप सिस्टम में उत्कृष्ट गति और स्थिति नियंत्रण।
- उच्च परिशुद्धता के साथ निरंतर कोणीय वेग पर शुरू करने, रोकने और संचालित करने की क्षमता।
- अत्यधिक डिटेन्टेड प्रकृति के कारण बिजली के बिना अपनी स्थिति को कुशलतापूर्वक बनाए रखें।
- पल्स का उपयोग करके आसान नियंत्रण जो प्रोग्रामिंग को सरल बनाता है।
- ब्रश न होने के कारण कम रखरखाव की आवश्यकता होती है।
- सीएनसी मशीनों जैसे अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त जहां स्थिति को सटीक रूप से नियंत्रित किया जाना चाहिए।

Disadvantages of Stepper Motor

Some disadvantages include:

- Produce less torque compared to brushed DC motors of similar size.
- Vibration and resonance are likely if not designed properly.
- Require driver circuit to function properly which increases cost.
- Feedback devices may be required for applications requiring high level of precision.
- Speed variations at higher output speeds due to limitations in response time.

स्टेपर मोटर के नुकसान

कुछ नुकसानों में शामिल हैं:

- समान आकार के ब्रश डीसी मोटर की तुलना में कम टॉर्क उत्पन्न करते हैं।
- यदि ठीक से डिज़ाइन नहीं किया गया है तो कंपन और प्रतिध्वनि की संभावना है।
- ड्राइवर सर्किट को ठीक से काम करने की आवश्यकता होती है जिससे लागत बढ़ जाती है।
- उच्च स्तर की परिशुद्धता की आवश्यकता वाले अनुप्रयोगों के लिए फीडबैक डिवाइस की आवश्यकता हो सकती है।
- प्रतिक्रिया समय में सीमाओं के कारण उच्च आउटपुट गति पर गति भिन्नता।

Applications of Stepper Motor

Some common applications of stepper motors include (Stepper motor applications)

- CNC machines like routers, lathes, mills, 3D printers.
- Peripheral equipment like printers, scanners, plotters, tape drives and CD/DVD drives.
- Industrial robotics, material handling, wafer handling equipment.
- Medical equipment like blood analyzers, imaging equipment.
- Automated production machinery like labeling machines.
- Scientific instruments like spectroscopy equipment.
- Desktop CNC machines, laser cutters, laser engravers.
- CCTV camera systems - for focus/zoom lens control.
- Radio-controlled vehicles, quadcopters, cranes for positioning.

स्टेपर मोटर के अनुप्रयोग

- स्टेपर मोटर के कुछ सामान्य अनुप्रयोगों में शामिल हैं (स्टेपर मोटर अनुप्रयोग)
- राउटर, लेथ, मिल, 3डी प्रिंटर जैसी सीएनसी मशीनें।
- प्रिंटर, स्कैनर, प्लॉटर, टेप ड्राइव और सीडी/डीवीडी ड्राइव जैसे परिधीय उपकरण।
- औद्योगिक रोबोटिक्स, सामग्री हैंडलिंग, वेफर हैंडलिंग उपकरण।
- रक्त विश्लेषक, इमेजिंग उपकरण जैसे चिकित्सा उपकरण।
- लेबलिंग मशीन जैसी स्वचालित उत्पादन मशीनरी।
- स्पेक्ट्रोस्कोपी उपकरण जैसे वैज्ञानिक उपकरण।

- डेस्कटॉप सीएनसी मशीनें, लेजर कटर, लेजर उत्कीर्णक।
- सीसीटीवी कैमरा सिस्टम - फोकस/ज़ूम लेंस नियंत्रण के लिए।
- रेडियो-नियंत्रित वाहन, क्वाडकॉप्टर, पोजिशनिंग के लिए क्रेन।

Difference between Stepper Motor and Servo Motor

Servo motors are suitable for high torque & speed applications whereas the stepper motor is less expensive so they are used where the high holding torque, acceleration with low-to-medium, the open otherwise closed-loop operation flexibility is required. The difference between the stepper motor and servo motor includes the following.

Stepper Motor	**Servo Motor**
The motor which moves in discrete steps is known as the stepper motor.	A servo motor is one kind of closed-loop motor that is connected to an encoder to provide speed feedback & position.
Stepper motor is used where control, as well as precision, are main priorities	Servo motor is used where the speed is the main priority
The overall pole count of the stepper motor ranges from 50 to 100	The overall pole count of servo motor ranges from 4to 12
In a closed-loop system, these motors move with a consistent pulse	These motors need an encoder to change pulses to control the position.
Torque is high in less speed	Torque is low in high speed
Positioning time is faster throughout short strokes	Positioning time is faster throughout long strokes
High-tolerance movement of inertia	Low-tolerance movement of inertia
This motor is suitable for low rigidity mechanisms like pulley and belt	Not suitable for less-rigidity mechanism
Responsiveness is high	Responsiveness is low
These are used for fluctuating loads	These are not used for fluctuating loads
The adjustment of gain/tuning is not required	The adjustment of gain/tuning is required

स्टेपर मोटर और सर्वो मोटर के बीच अंतर

सर्वो मोटर उच्च टॉर्क और गति अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त हैं जबकि स्टेपर मोटर कम खर्चीली होती है इसलिए उनका उपयोग वहाँ किया जाता है जहाँ उच्च होल्डिंग टॉर्क, कम-से-मध्यम के साथ त्वरण, खुला अन्यथा बंद-लूप संचालन लचीलापन की आवश्यकता होती है। स्टेपर मोटर और सर्वो मोटर के बीच अंतर में निम्नलिखित शामिल हैं।

स्टेपर मोटर	**सर्वो मोटर**
वह मोटर जो अलग-अलग चरणों में चलती है उसे स्टेपर मोटर कहते हैं।	सर्वो मोटर एक प्रकार की बंद लूप मोटर है जो गति एवं स्थिति संबंधी फीडबैक प्रदान करने के लिए एनकोडर से जुड़ी होती है।
स्टेपर मोटर का उपयोग वहां किया जाता है जहां नियंत्रण के साथ-साथ परिशुद्धता भी मुख्य प्राथमिकता होती है	सर्वो मोटर का उपयोग वहां किया जाता है जहां गति मुख्य प्राथमिकता होती है
स्टेपर मोटर की कुल ध्रुव संख्या 50 से 100 तक होती है	सर्वो मोटर की कुल ध्रुव संख्या 4 से 12 तक होती है
बंद लूप प्रणाली में, ये मोटर एक सुसंगत पल्स के साथ चलते हैं	इन मोटरों को स्थिति को नियंत्रित करने के लिए पल्स को बदलने के लिए एक एनकोडर की आवश्यकता होती है .
कम गति में टॉर्क अधिक होता है	उच्च गति पर टॉर्क कम होता है
छोटे स्ट्रोक के दौरान पोजिशनिंग का समय तेज होता है	लंबे स्ट्रोक के दौरान पोजिशनिंग का समय तेज होता है
जड़त्व की उच्च सहनशीलता गति	जड़त्व की कम सहनशीलता वाली गति
यह मोटर पुली और बेल्ट जैसे कम कठोरता वाले तंत्रों के लिए उपयुक्त है	कम कठोरता वाले तंत्र के लिए उपयुक्त नहीं

प्रतिक्रियाशीलता उच्च है	प्रतिक्रियाशीलता कम है
इनका उपयोग उतार-चढ़ाव वाले भार के लिए किया जाता है	इनका उपयोग उतार-चढ़ाव वाले भार के लिए नहीं किया जाता
लाभ/ट्यूनिंग का समायोजन आवश्यक नहीं है	लाभ/ट्यूनिंग का समायोजन आवश्यक है