महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त) (ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

अभियांत्रिकी आणि तंत्रज्ञान पदविका

शिक्षण पुस्तिका

(Learning Material)

कंट्रोल सिस्टिम्स

CONTROL SYSYEMS

(314337)

यंत्र अभियांत्रिकी गट

मराठी – इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम

(अभियांत्रिकी व तंत्रज्ञान चौथे सत्र पदविका)

MAHARASHTRA STATE BOARD OF TECHNICAL EDUCATION MUMBAI

शिक्षण पुस्तिका

Learning Material

कंट्रोल सिस्टिम्स

Control Systems

(314337)

मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यम

(अभियांत्रिकी व तंत्राज्ञानातील चौथे सत्र पदविका)

महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त) (ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

एम. एस. बी. टी. ई.
मार्गदर्शक

श्री. एस. एस. हरीप

निवड श्रेणी अधिव्याख्याता, यांत्रिकी अभियांत्रिकी

संकलक

श्री. एम.एस. दुकळे

अधिव्याख्याता, यांत्रिकी अभियांत्रिकी

श्री. के.एच. बोरसे

अधिव्याख्याता, मेकॅट्रॉनिक्स अभियांत्रिकी

कु. पी. जी. देशमुख

अधिव्याख्याता, अनुविद्युत व दूरसंचार अभियांत्रिकी

श्री. एस.एल.कुटे

अधिव्याख्याता, मेकॅट्रॉनिक्स अभियांत्रिकी

श्री. व्ही.ई. कोठावदे

अधिव्याख्याता, यांत्रिकी अभियांत्रिकी

समीक्षक

श्री. वाय. बी. गायधनी

अधिव्याख्याता, यांत्रिकी अभियांत्रिकी

मुख्य समन्वयक

श्री. पी. टी.कडवे

प्राचार्य

संस्था समन्वयक

श्री. जे. टी. डेर्ले

अधिव्याख्याता, यांत्रिकी अभियांत्रिकी

MAHARASHTRA STATE BOARD OF TECHNICAL EDUCATION
MUMBAI

महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ

(**स्वायत्त**) (ISO: ९००१:२०१५) (ISO/IES: २७००१-२०१३)

शासकीय तंत्रनिकेतन इमारत, चौथा मजला, ४९, खेरवाडी, बांद्रा (पूर्व), मुंबई - ४०० ०५१.

दूरध्वनी क्र.: ०२२-६२५४२१७० / १६१

Email : director@msbte.com Web : www.msbte.org.in

प्रास्ताविक

महाराष्ट्र राज्यातील पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षणामध्ये विद्यार्थ्यांचे रोजगार कौशल्य विकसित करून विद्यार्थ्यांचा सर्वांगीण विकास घडवून आणण्याकरिता महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ कटिबद्ध आहे. उद्योगधंद्यातील बदलत्या तंत्रज्ञानाशी संबंधित गरजा लक्षात घेऊन महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाकडून पदविका अभ्यासक्रम वेळोवेळी अद्यावत करण्यात येतो . अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रम शिकत असतांना संकल्पनात्मक ज्ञान, सुसंगत संदर्भ, प्रश्न विचारणे, विश्वसनिय पुरावे, कारणमीमांसा आणि सुस्पष्ट निकष यांचा वापर करून अर्थाची उकल करण्याची, विश्लेषण व मूल्यमापन करण्याची तसेच तर्काने अनुमान काढण्याची क्षमता म्हणजेच चिकित्सक विचार विद्यार्थ्यांमध्ये अधिक दृढ होतील असा मला विश्वास आहे. जेव्हा विद्यार्थी ज्ञान मिळवण्याच्या माध्यमाशी पूर्णपणे परिचित आणि सोयीस्कर असतात, तेव्हा त्यांच्यासाठी वर्गातील चर्चेत भाग घेणे सोपे होते, संकल्पनात्मक व सैद्धांतिक बाबींचे आकलन परिपूर्ण होते, संज्ञानात्मक क्षमता सुधारते आणि त्यांचा आत्मविश्वास देखील वाढतो या सर्व गोष्टींचा विचार करून मंडळाकडून शैक्षणिक सामुग्रीची निर्मिती करण्यात आलेली आहे . भारत देश हा खेड्यापाड्यातून विकसित झालेला देश असून ग्रामीण भागातील विद्यार्थ्यांना तांत्रिक शिक्षण घेतांना भाषेचा अडसर न येता तांत्रिक बाबींचा आशय समजून घेणे शक्य होईल या दृष्टिकोनातून महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाने पदविका स्तरावरील तांत्रिक शिक्षणाकरीता विद्यार्थ्यांना मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय शैक्षणिक वर्ष २०२१-२२ पासून उपलब्ध करून दिलेला आहे .

राष्ट्रीय शैक्षणिक धोरण-२०२० प्रादेशिक भाषेतील शिक्षणास प्रोत्साहन देते, ज्यामुळे विद्यार्थ्यांना तांत्रिक अभ्यासक्रमांसाठी प्रादेशिक भाषांतुन शिक्षणाचे माध्यम निवडता येते. सदर धोरणामुळे प्रादेशिक भाषांमध्ये तांत्रिक सामग्री आणि अभ्यास सामग्रीचा विकास आणि भाषांतर निर्माण करण्याची आवश्यकता आहे . त्यास अनुसरून मंडळाने मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय द्वितीय व तृतीय वर्षाकरिताही उपलब्ध करून देण्यात आला आहे. तसेच त्याकरिताची शैक्षणिक सामग्रीही संबंधीत भागधारकरांना उपलब्ध करून देण्यात येत आहे.

पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षण अधिक दर्जेदार करण्यासाठी महाराष्ट्रातील अनुभवी व तज्ञ अध्यापकांनी व्यवहारिक मराठी भाषा व इंग्रजी भाषेतील तांत्रिक शब्दावली यांचा वापर करून मराठी - इंग्रजी भाषेचा सुवर्णमध्य साधण्याचा प्रयत्न केलेला आहे. मंडळाच्या स्तरावर गठीत सुकाणू समितीमार्फत सदर शैक्षणिक सामुग्रीचा दर्जा, तसेच इतर बाबींची तपासणी करण्यात आलेली आहे. त्यामुळे सदर शैक्षणिक सामुग्री अधिक सम्पन्न झालेली असून विद्यार्थी त्यांच्या व्यक्तिमत्त्वाचा सुसंवादी आणि सर्वांगीण विकास साधतील. परिणामतः विश्वस्तरीय मनुष्यबळाच्या गरजा पूर्ण करण्यात महाराष्ट्र राज्य अग्रेसर राहील व पर्यायाने राष्ट्रनिर्मिती करीता निश्चितच हातभार लागेल , असा मला विश्वास आहे.

अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रमातील प्रमुख विषयांची मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक शैक्षणिक सामुग्री बनविण्यासाठी अध्यापक व सुकाणू समितीचे सदस्य यांनी दर्शविलेले समर्पण व वचनबद्धता कौतुकास पात्र आहे , या सर्वांचे मी मनः पूवक अभिनंदन करतो !

(प्रमोद नाईक)
संचालक
म. रा. तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई.

अनुक्रमाणिका

Sr. No	Unit Name	Page No
1	Overview of Control Systems ओवरव्ह्यू ऑफ कंट्रोल सिस्टिम्स	1
2	Time Domain Analysis टाइम डोमेन अनॅलिसिस	15
3	Stability Analysis स्टॅबिलिटी अनॅलिसिस	42
4	Process Controllers and Control Actions प्रोसेस कंट्रोल अँड कंट्रोल ऍक्शन्स	55
5	Servo System and Components सर्वो सिस्टिम आणि घटक	71

Unit 1 Overview of Control Systems
ओवरव्ह्यू ऑफ कंट्रोल सिस्टिम्स

विषय निष्पत्ती (CO): कंट्रोल सिस्टिमचे प्रकार समजून घेणे.

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

TLO 1.1 दिलेली कंट्रोल सिस्टिम ओळखा.

TLO 1.2 कंट्रोल सिस्टिमच्या विविध प्रकारांमध्ये फरक करा.

TLO 1.3 दिलेल्या कंट्रोल सिस्टिम चे ट्रान्सफर फंक्शन काढणे

TLO 1.4 ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन नियम वापरून दिलेल्या सिस्टिमचे ट्रान्सफर फंक्शन ऑप्टिमाइझ करा.

1.1 कंट्रोल सिस्टीम:

सिस्टिम म्हणजे विविध भौतिक घटकांची योग्य प्रकारे जोडलेली अशी व्यवस्था जेणेकरून एक संपूर्ण युनिट तयार होईल आणि कार्य करू शकेन.

कंट्रोल सिस्टीम म्हणजे योग्य प्रकारे जोडलेल्या भौतिक घटकांचे एक संपूर्ण युनिट जे स्वतःला किंवा दुसऱ्या सिस्टीमला कमांड देऊ शकेन किंवा नियमन करू शकेन.

1.1.1 कंट्रोल सिस्टीमचे घटक:

टेबल 1.1

कंट्रोल सिस्टीमचे घटक (उदाहरण: तापमान कंट्रोल सिस्टीम)

घटक	व्याख्या
रेफरन्स इनपुट	क्लोज्ड लूप सिस्टीममध्ये तुलनेसाठी वापरला जाणारा स्टँडर्ड सिग्नल. उदा. इनपुट: इच्छित तापमान.
ॲक्च्युएटिंग सिग्नल	फीडबॅक सिग्नल आणि रेफरन्स सिग्नल मधील फरकाला ॲक्च्युएटिंग सिग्नल म्हणतात. उदा. हीटिंग एलिमेंट.
कंट्रोल घटक / कंट्रोलर	कंट्रोल इनपुट (डिझायर्ड व्हॅल्यू) ची वास्तविक आउटपुटशी तुलना करतो आणि कोणतीही त्रुटी दुरुस्त करण्यासाठी कंट्रोल सिग्नल तयार करतो. उदा. थर्मोस्टॅट.
प्लांट / प्रक्रिया	सिस्टिम किंवा प्रक्रिया नियंत्रित केली जात असतांना, जिथे नियंत्रण सिग्नल प्राप्त करते आणि आउटपुट तयार करते. उदा. हीटर.
कंट्रोल्ड व्हेरिएबल	कंट्रोल सिस्टिमचे प्रमाण किंवा स्थिती जी थेट मोजली जाऊ शकते आणि नियंत्रित केली जाऊ शकते त्याला कंट्रोल्ड व्हेरिएबल म्हणतात. उदा. प्रत्यक्ष खोलीचे तापमान
डिस्टर्बन्स	सिस्टिमच्या कार्यक्षमतेवर परिणाम करणारा रेफरन्स वगळता इतर कोणत्याही सिग्नलला डिस्टर्बन्स म्हणतात. उदा. उघड्या खिडक्या किंवा सूर्यप्रकाश यासारख्या वातावरणातून उष्णता कमी किंवा जास्त होणे.
फीडबॅक	फीडबॅक म्हणजे सिस्टिमचे आउटपुट मोजण्याची आणि इनपुटशी तुलना करण्यासाठी कंट्रोलरकडे परत पाठविण्याची प्रक्रिया. उदा. तापमान सेन्सर.
सिस्टिम एरर	ॲक्च्युअल व्हॅल्यू आणि आयडिअल व्हॅल्यू यांच्यातील फरकाला सिस्टिम एरर म्हणतात. उदा. निर्धारित तापमान आणि प्रत्यक्ष तापमान यांच्यातील फरक.

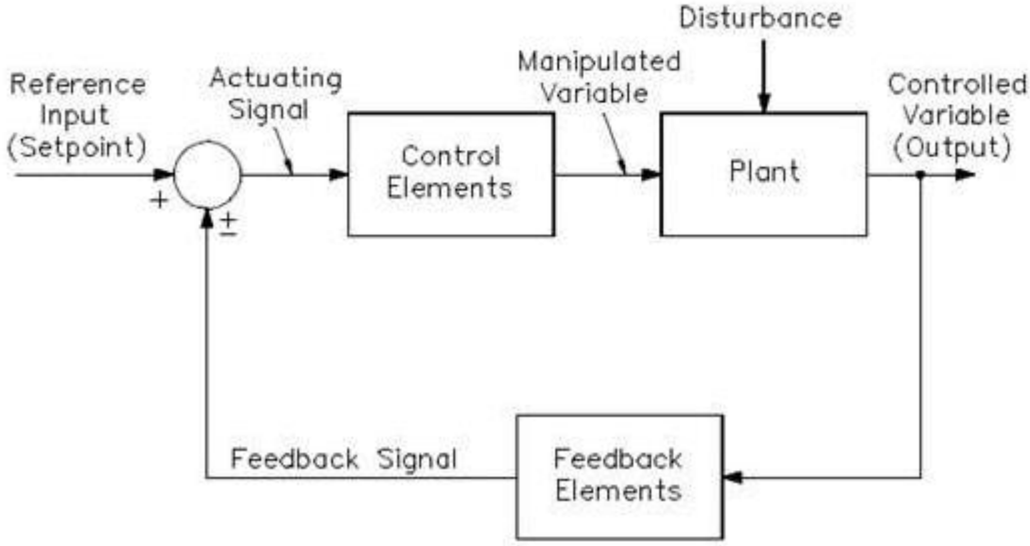


Fig. 1.1
कंट्रोल सिस्टिम ब्लॉक डायग्राम

1.1.2 कंट्रोल सिस्टिमची उदाहरणे: ॲप्लिकेशन्स:

1. ऑटोमोबाईलचे स्टीअरिंग कंट्रोल.
2. औद्योगिक शिलाई मशीन.
3. सोलर कलेक्टर चे सन-ट्रॅकिंग कंट्रोल.
4. गती नियंत्रण प्रणाली.
5. विद्युत भट्टीचे तापमान नियंत्रण.

1.2 कंट्रोल सिस्टिमचे प्रकार:

1.2.1 **ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिम:** ज्या कंट्रोल सिस्टिममध्ये नियंत्रण क्रिया सिस्टिमच्या आउटपुटपासून पूर्णपणे स्वतंत्र असते तेव्हा त्याला ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिम म्हणतात. ॲक्च्युएटिंग सिग्नल केवळ इनपुट कमांडवर अवलंबून असतो आणि आउटपुटचे त्यावर कोणतेही नियंत्रण नसते. मॅन्युअल कंट्रोल सिस्टीम ही ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टीम आहे.

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिमचे घटक सहसा खालील दोन भागांमध्ये विभागले जाऊ शकतात.

1. कंट्रोलर;
2. कंट्रोल्ड प्रोसेस.

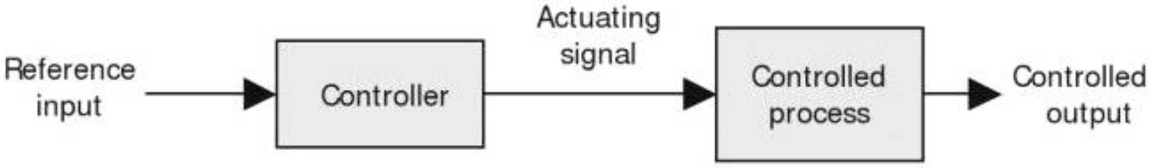


Fig 1.2
ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टीमची ब्लॉक डायग्राम

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिम ही एक प्रकारची सिस्टिम आहे जी फीडबॅकशिवाय कार्य करते. याचा अर्थ असा की सिस्टिमचे आउटपुट मोजले जात नाही आणि इनपुट ॲडजस्ट करण्यासाठी वापरले जात नाही. त्याऐवजी, इनपुट केवळ पूर्वनिर्धारित व्हॅल्यूवर सेट केले जाते आणि सिस्टिम त्याच्या नॅचुरल एंडपॉइंट पर्यंत

पोहोचेपर्यंत चालण्याची परमिशन दिली जाते. ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिमच्या सिम्पलीसिटी आणि इकॉनॉमीमुळे आपल्याला बऱ्याच नॉन-क्रिटिकल ॲप्लिकेशन्समध्ये या प्रकारची सिस्टिम आढळते.

ओपन लूप कंट्रोल सिस्टीमचे उदाहरणे:

ओपन-लूप कंट्रोल सिस्टिमचे विविध वास्तविक जगातील परिस्थितींमध्ये ॲप्लिकेशन्स आहेत.

1. इलेक्ट्रिक फॅन: इनपुट ही इलेक्ट्रिकल पॉवर आहे, कंट्रोलर मध्यवर्ती स्थित शाफ्ट आहे जो फिरतो आणि आउटपुट म्हणजे पंख्याचा रोटेशनल स्पीड.
2. ओव्हन टेम्परेचर कंट्रोल: या बाबतीत आपण इच्छित तापमान सेट करतो आणि प्रत्यक्ष तापमानाचे सतत निरीक्षण न करता ओव्हन त्या तापमानापर्यंत गरम होते.
3. वॉशिंग मशीन सायकल सिलेक्शन: जेव्हा आपण कपड्यांच्या प्रकारानुसार वॉशिंग मशीन सायकल निवडतो तेव्हा मशीन सतत पाण्याचे तापमान किंवा कपड्यांची स्थिती न मोजता पूर्वनिर्धारित प्रोग्रामचे अनुसरण करते.
4. इलेक्ट्रॉनिक डिव्हाइससाठी रिमोट कंट्रोल: टीव्ही आणि इतर इलेक्ट्रॉनिक डिव्हाइसेससाठी रिमोट कंट्रोल डिव्हाइसने कमांड यशस्वीरित्या अंमलात आणली की नाही याबद्दल अभिप्राय न घेता कमांड पाठवतात.

1.2.2 **क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टीम:** क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टिम ही एक सिस्टिम आहे ज्यामध्ये नियंत्रण क्रिया आउटपुटवर अवलंबून असते. क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टिमचा प्राथमिक उद्देश सिस्टिमची स्टॅबिलिटी, अचूकता आणि एकंदर कार्यक्षमता वाढविणे आहे. या सिस्टिममध्ये कंट्रोल्ड आउटपुट फीडबॅक एलिमेंटद्वारे परत फीड केले जाते आणि रेफरन्स इनपुटशी तुलना केली जाते. अशा प्रकारे ॲक्च्युएटिंग सिग्नल म्हणजे डिझायर्ड आउटपुट आणि रेफरन्स इनपुटचा फरक.

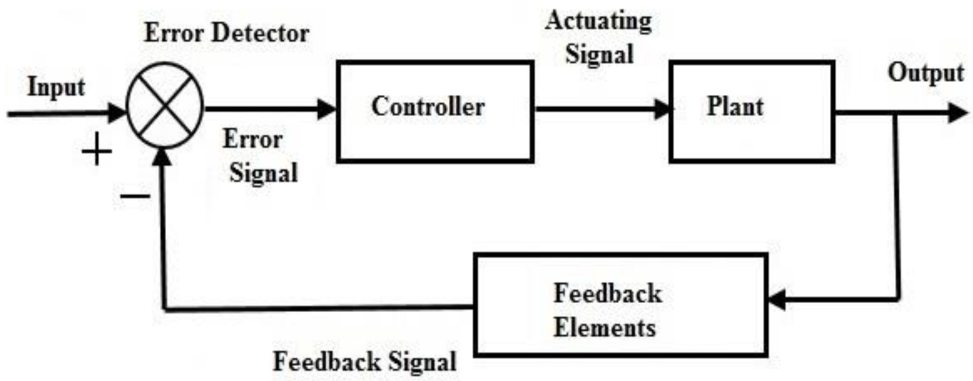


Fig 1.3
क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टीम

क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टीमचे वर्किंग: नियंत्रक सतत फीडबॅक एलेमेंट्सद्वारे डिझायर्ड इनपुटची ॲक्चुअल आउटपुटशी तुलना करतो. जर डिफरन्स (एरर) असेल तर कंट्रोलर एरर कमी करण्यासाठी त्याचे आउटपुट प्लांटमध्ये ॲडजस्ट करतो. हे सतत मॉनिटरिंग आणि ॲडजस्टमेंट प्लांटमध्येच डिस्टर्बन्सेस किंवा बदल झाले तरीही आउटपुट डिझायर्ड इनपुटच्या जवळ ठेवते.

क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टिमची उदाहरणे:

आपल्या दैनंदिन जीवनातील अनेक ॲप्लिकेशन्समध्ये क्लोज्ड लूप सिस्टिम चा वापर होतो.

1. एअर कंडिशनर - एअर कंडिशनर आपल्या खोलीच्या तापमानानुसार आपोआप त्याचे तापमान समायोजित करते.
2. सर्वो व्होल्टेज स्टॅबिलायझर - आउटपुट व्होल्टेज सिस्टिममध्ये परत फीड करून व्होल्टेजमध्ये स्थिरीकरण साध्य केले जाते.
3. वॉटर लेवल कंट्रोलर - वॉटर टँकमधील पाण्याची पातळी त्यात कधी पाणी ॲड करायचे ते ठरवते.
4. ऑटोमॅटिक इलेक्ट्रिक आयर्न – इलेक्ट्रिक आयर्नच्या तापमानानुसार हीट आपोआप कंट्रोल होते.

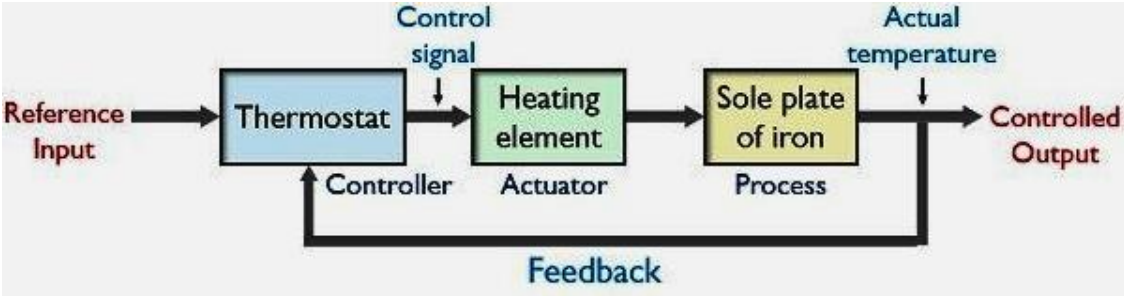


Fig. 1.4

ऑटोमॅटिक इलेक्ट्रिक आयर्न

(courtsey: Examples of Closed-Loop Control System - Electronics Coach)

टेबल 1.2

ओपन लूप सिस्टिम आणि क्लोज्ड लूप सिस्टिम मधील तुलना

क्र.सं.	पॅरामीटर्स	ओपन लूप सिस्टिम	क्लोज्ड लूप सिस्टिम
1	व्याख्या	ज्या सिस्टिमची कंट्रोल ॲक्शन आउटपुटपासून मुक्त असते त्याला ओपन लूप कंट्रोल सिस्टिम म्हणून ओळखले जाते..	क्लोज्ड लूपमध्ये, आउटपुट सिस्टिमच्या कंट्रोल ॲक्शनवर अवलंबून असते.
2	दुसरे नाव	नो फीडबॅक सिस्टिम	फीडबॅक सिस्टिम
3	घटक	कंट्रोलर आणि कंट्रोल्ड प्रोसेस	ॲम्प्लिफायर, कंट्रोलर, कंट्रोल्ड प्रोसेस, फीडबॅक
4	निर्मिती	सिम्पल	कॉम्प्लेक्स
5	विश्वसनीयता:	विश्वसनीय नाही	विश्वसनीय
6	अचूकता	कॅलिब्रेशनवर अवलंबून असते	फीडबॅकमुळे अचूक.
7	स्टॅबिलिटी	स्टेबल	कमी स्टेबल
8	रिस्पॉन्स	जलद	हळू
9	लिनिअरिटी	नॉन लिनिअर	लिनिअर
10	उदाहरणे	ट्रॅफिक लाईट, ऑटोमॅटिक वॉशिंग मशीन, टीव्ही रिमोट इ.	एअर कंडिशनर, तापमान कंट्रोल सिस्टिम, रेफ्रिजरेटर, टोस्टर.

1.2.3 लिनिअर आणि नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम:

1.लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम: लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम ही एक अशी सिस्टिम आहे जिथे इनपुट आणि आउटपुट मधील संबंध सोप्या आणि प्रपोरशनल नियमांचे अनुसरण केले जाते. म्हणजे इनपुट दुप्पट केल्यास आउटपुटही दुप्पट होईल. या सिस्टिमचे विश्लेषण आणि अंदाज लावणे सोपे आहे.

1. प्रपोरशनॅलिटी: आउटपुट थेट इनपुटच्या प्रमाणात असते.
2. सुपरपोझिशन: दोन इनपुट लावल्यास एकूण आउटपुट म्हणजे इंडीव्हिझ्यूल आऊटपुटची बेरीज.
3. होमोजेनीटी: इनपुट स्केल केल्यास (उदा. दुप्पट) आउटपुटही त्याच स्केलने मोजले जाते.

लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम चे उदाहरण:

1. एअर कंडिशनर आणि हीटर, 2. डीसी मोटर स्पीड कंट्रोल, 3 ऑटोमोबाइल क्रूझ कंट्रोल
2. आरसी सर्किट (रेझिस्टर-कैपेसिटर सर्किट)

2.नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम: नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम ही अशी सिस्टिम आहे जिथे इनपुट आणि आउटपुट मधील संबंध प्रपोरशनल नसतो. या सिस्टिममध्ये, इनपुटमधील लहान बदलांमुळे आउटपुटमध्ये मोठे किंवा अनपेक्षित बदल होऊ शकतात. नॉन-लिनिअर सिस्टिम अधिक जटिल आणि विश्लेषण करणे कठीण आहे.नॉन-लिनियर कंट्रोल सिस्टीममध्ये खालील मुद्द्यांचा विचार केला जातो..

1. नॉन-प्रपोरशनॅलिटी: आउटपुट इनपुटसह प्रपोरशनल प्रमाणात मोजले जात नाही.
2. नो सुपरपोझिशन: वेगवेगळ्या इनपुटपासून एकूण आउटपुट म्हणजे फक्त वैयक्तिक आउटपुटची बेरीज नाही.
3. कॉम्प्लेक्स बिहेवियर: या सिस्टिममध्ये सॅच्युरेशन, डेड झोन किंवा अनपेक्षित प्रतिसाद यासारखे वर्तन असू शकते**.**

नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिमची उदाहरणे:

1. रोबोटिक आर्म्स आणि मॅनिपुलेटर्स
2. व्हेईकल ससपेन्शन सिस्टिम
3. विमान उड्डाण नियंत्रण नॉनलाइनर फ्लाइट डायनॅमिक्स
4. पावर ग्रिड स्टॅबिलिटी
5. रासायनिक अणुभट्ट्या

टेबल 1.3

लिनिअर आणि नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम मधील तुलना:

पॅरामीटर	लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम	नॉन-लिनिअर कंट्रोल सिस्टिम
संबंध	प्रपोरशनल (उदा. इनपुट दुप्पट केल्यास आउटपुट दुप्पट होते)	प्रपोरशनल नाही (आउटपुट चा अंदाज येत नाही)
बिहेवियर	प्रमाणित आणि कंसिस्टन्ट	अनएक्सपेक्टेड किंवा कॉम्प्लेक्स असू शकते
ऍनॅलिसिस (विश्लेषण)	साधी साधने वापरून विश्लेषण करणे सोपे (उदा. ट्रान्सफर फंक्शन)	कॉम्प्लेक्स असल्यामुळे विश्लेषण करणे कठीण
उदाहरण	रूम हीटिंग सिस्टिम, मोटर स्पीड कंट्रोल	व्हेईकल ससपेन्शन सिस्टिम, विमान उड्डाण कंट्रोल

1.2.4 टाइम-व्हेरिएंट आणि टाइम-इनव्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिम:

1. **टाइम-व्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिम:** टाइम-व्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिम ही अशी सिस्टिम आहे ज्याचे पॅरामीटर किंवा बिहेवियर काळानुसार बदलते. सिस्टिमची वैशिष्ट्ये निश्चित नसतात आणि काळानुसार ते बदलतात. विजेची बदलती मागणी, पर्यावरणीय फॅक्टर्स किंवा हंगाम (Season) यासारख्या बदलत्या परिस्थितीशी किंवा इनपुटशी ही सिस्टिम जुळवून घेते.

   टाइम-व्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिमची उदाहरणे:
   1. गाईडन्स आणि कंट्रोलसाठी अंतराळ-यान आणि विमाने.
   2. मानवरहित हवाई वाहने (यूएव्ही)
   3. रासायनिक प्रक्रिया आणि उत्पादन अशा विविध उद्योगांमध्ये वापरला जातो.
   4. स्मार्ट गिर्ड आणि एनर्जी मॅनेजमेंटमध्ये वापरले जाते.
   5. शेतीमध्ये वापरला जातो.
   6. मेडिकल व्हेंटिलेटर,
   7. कृषी आणि औद्योगिक रोबोट,
   8. एअर कंडिशनर.

2. **टाइम-इनव्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिम:** टाइम-इनव्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिम ही अशी सिस्टिम आहे जिचे बिहॅवियर आणि वैशिष्ट्ये काळानुसार बदलत नाहीत. एखाद्या इनपुटला सिस्टिमचा प्रतिसाद नेहमीच समान असतो, मग तो इनपुट केव्हा लागू केला जाईल याची पर्वा होत नाही. सिस्टिम वेळोवेळी एकसारखी आणि अंदाज लावता येण्यासारखी राहते.

   टाइम-इनव्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टीममध्ये खालील मुद्द्यांचा विचार केला जातो.

   कॉन्स्टन्ट (स्थिर) पॅरामीटर्स: सिस्टिमचे पॅरामीटर्स, जसे की लाभ, गतिशीलता आणि रिस्पॉन्स टाईम, स्थिर असतात आणि काळानुसार बदलत नाहीत.

   प्रेडिक्टेबल बिहेवियर: जर आपण वेगवेगळ्या वेळी समान इनपुट लागू केले तर सिस्टिम प्रत्येक वेळी समान आउटपुट देईल.

टाइम-इनव्हेरिएंट कंट्रोल सिस्टिमची उदाहरणे:
1. डीसी मोटर स्पीड कंट्रोल
2. आरसी सर्किट (रेझिस्टर-कैपेसिटर सर्किट)
3. तापमान कंट्रोल सिस्टिम (थर्मोस्टॅट)
4. लिफ्ट कंट्रोल सिस्टिम
5. स्प्रिंग मास सिस्टिम.
6. स्वयंचलित प्रकाश सिस्टिम
7. लिनिअर एम्पलीफायर सर्किट

1.3 ट्रान्सफर फंक्शन: कंट्रोल सिस्टिमचे ट्रान्सफर फंक्शन हे एक गणितीय रिप्रेसेंटेशन आहे जे लॅप्लेस डोमेन (फ्रिक्वेन्सी डोमेन) मधील सिस्टिमच्या इनपुट आणि आउटपुटमधील संबंधांचे वर्णन करते. हे सामान्यत: टाइम-इनव्हेरिएंट सिस्टिमसाठी वापरले जाते. हे लॅप्लेस ट्रान्सफर आउटपुटचे लॅप्लेस ट्रान्सफर इनपुटशी गुणोत्तर आहे, सुरुवातीच्या सर्व कंडिशन्स शून्यावर सेट केल्या आहेत. हे सिस्टिम बिहॅवियर, स्टॅबिलिटी आणि फ्रीक्वेन्सी रिस्पॉन्सचे विश्लेषण करण्यास मदत करते.

Fig .1.5

ब्लॉक डायग्राम ट्रान्सफर फंक्शन

ट्रान्सफर फंक्शन G(s) ची व्याख्या अशी केली जाते:

$$G(s) = Y(s)/U(s)$$

जिथे:

Y(s) हे आउटपुटचे लॅप्लेस रूपांतर आहे.

U(s) हे इनपुटचे लॅप्लेस रूपांतर आहे.

s हे लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्ममध्ये वापरले जाणारे कॉम्प्लेक्स फ्रिक्वेन्सी व्हेरिएबल आहे.

(लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म हे एक गणिती तंत्र आहे जे टाइम डोमेन (सहसा डिफरेंशियल समीकरण) पासून फ्रिक्वेन्सी डोमेनमध्ये (कॉम्प्लेक्स व्हेरिएबल s वापरुन) फंक्शनचे रूपांतर करण्यासाठी वापरले जाते. हे डिफरंशिअल समीकरणांचे बीजगणितीय समीकरणांमध्ये रूपांतर करून सिस्टिमचे, विशेषत: कंट्रोल सिस्टिमचे विश्लेषण सोपे करते)

टाइम-डोमेन फंक्शन f(t) द्वारे वर्णन केलेल्या सिस्टिमसाठी, त्याचे लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म f (s) द्वारे दिले जाते:

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st}\,dt$$

जिथे:

f (t) म्हणजे टाइम-डोमेन फंक्शन (उदा., इनपुट किंवा आउटपुट सिग्नल),

s म्हणजे कॉम्प्लेक्स व्हेरिएबल,

F(s) हे लॅप्लेस डोमेनमधील ट्रान्सफर फंक्शन आहे.

1.3.2 इलेक्ट्रिकल सर्किटचे ट्रान्सफर फंक्शन (RL, RC, LC, आणि RLC सर्किट):

निष्क्रिय एलिमेंटचे (Paasive Element) लॅप्लेस ट्रान्सफर (R, L आणि C)

लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म वेगवेगळ्या सर्किट एलेमेंट्सवर स्वतंत्रपणे वापरले जाऊ शकते आणि नंतर सर्किट पूर्णपणे s डोमेनमध्ये सोडविले जाऊ शकते. (जे खूप सोपे आहे).

1. **R चे लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म:** रेसिस्टर्स हे वेळ आणि फ्रिक्वेन्सी व्हेरिएन्ट आहेत. म्हणजेच रेसिस्टरचा ट्रान्सफॉर्म आणि रेसिस्टरचे रेसिस्टन्स सारखेच असते. $\mathcal{L}\{R\} = R$

   (येथे, $\mathcal{L}$: - लाप्लास ट्रान्सफॉर्म सिम्बॉल)

2. **C चे लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म:** टाइम डोमेनमधील व्होल्टेज, करंट आणि कॅपेसिटन्स यांच्यातील संबंध पाहूया,

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

व्होल्टेजसाठी सोडवताना, खालील समीकरण मिळते.

$$v(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)\,dt$$

मग हे समीकरण लॅप्लेस डोमेनमध्ये रूपांतरित करून खालील समीकरण मिळते.

$$V(s)=\frac{1}{C}\frac{1}{s}I(\mathrm{s})$$

पुन्हा V (s) / I (s) गुणोत्तरासाठी सोडविल्यास, खालील समीकरण मिळते.

$$\frac{V(\mathrm{s})}{I(\mathrm{s})}=\frac{1}{sC}$$

म्हणून कॅपेसिटन्स C असलेल्या कॅपेसिटरचे ट्रान्सफर खालीलप्रकारे दिले जाते.

$\mathscr{L}$(Capacitor) = 1 / sC

3. **L चे लॅप्लेस ट्रान्सफॉर्म:**

टाईम डोमेनमध्ये व्होल्टेज, करंट आणि इंडक्टन्स यांच्यातील संबंध पाहूया:

$$v(\mathrm{t})=\mathrm{L}\frac{di(\mathrm{t})}{dt}$$

हे लॅप्लेस डोमेनमध्ये ठेवून, फॉर्मुला मिळतो

$$V(\mathrm{s})=\mathrm{sLI(s)}$$

आणि गुणोत्तर मिळतो

$$\frac{V(\mathrm{s})}{\mathrm{I(s)}}=\mathrm{sL}$$

त्यामुळे इंडक्शन L असलेल्या इंडक्टरचा ट्रान्सफॉर्म असा आहे

$\mathscr{L}$(Inductor) = sL

खालील मूलभूत RL, RC, LC, आणि RLC सर्किटसाठी ट्रान्सफर फंक्शन्स आहेत:

1. **RL सर्किट (रेसिस्टर + इंडक्टर):**

   प्रकार: लो-पास फिल्टर (करंट रिस्पॉन्स)

   ट्रान्सफर फंक्शन:

$$H(s)=\frac{I(s)}{V(s)}=\frac{1}{Ls+R}$$

   सर्किट इंडक्टरमुळे करंटमधील बदलांना प्रतिकार करतो. हे कमी-फ्रिक्वेन्सी सिग्नलला पास होऊ देते आणि उच्च-फ्रिक्वेन्सी सिग्नलला ब्लॉक करते.

2. **RC सर्किट (रेसिस्टर + कॅपॅसिटर):**

   प्रकार: लो-पास किंवा हाय-पास फिल्टर (कॉन्फिगरेशनवर अवलंबून)

   ट्रान्सफर फंक्शन:

$$H(s)=\frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)}=\frac{1}{1+sRC}$$

   कॅपॅसिटर डीसी सिग्नल ब्लॉक करते आणि एसी सिग्नल पास करण्यास अनुमती देते. फिल्टरिंग ॲप्लिकेशन्समध्ये वापरले जाते..

3. **LC सर्किट (इंडक्टर + कॅपॅसिटर):**

   प्रकार: रेझोनंट सर्किट (ऑस्सीलेटर)

ट्रान्सफर फंक्शन:

$$H(s) = \frac{1}{Ls^2 + \frac{1}{C}}$$

हे सर्किट एका विशिष्ट फ्रिक्वेन्सीवर प्रतिध्वनित (Resonate) होते, ज्यामुळे ते रेडिओ आणि दळणवळण प्रणालींमध्ये उपयुक्त ठरते.

4. RLC सर्किट (रेसिस्टर + इंडक्टर + कॅपॅसिटर)

प्रकार: बँड-पास किंवा बँड-स्टॉप फिल्टर

ट्रान्सफर फंक्शन:

$$H(s) = \frac{1}{Ls + R + \frac{1}{Cs}}$$

R, L आणि C च्या मूल्यांवर अवलंबून, हे सर्किट इतरांना परवानगी देताना विशिष्ट फ्रिक्वेन्सी फिल्टर करू शकते.

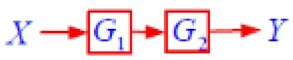
1.4 ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्निक: ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्निक हे कंट्रोल सिस्टिम इंजिनीअरिंग आणि इतर क्षेत्रांमध्ये एक महत्त्वपूर्ण तंत्र आहे जेथे सिस्टिम विझ्युअली दर्शविले जाते. हे कॉम्प्लेक्स आकृती सोपे करते, ज्यामुळे ते समजून घेणे आणि विश्लेषण करणे सोपे होते.

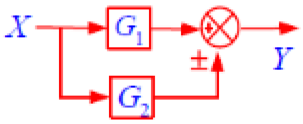
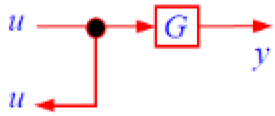
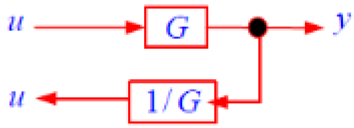
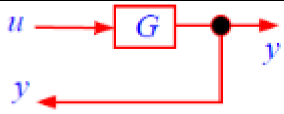
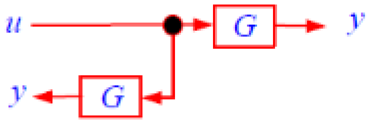
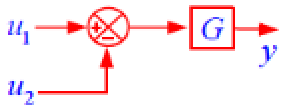
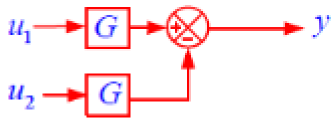
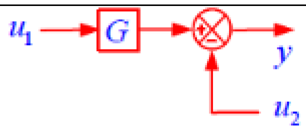
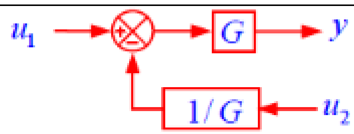
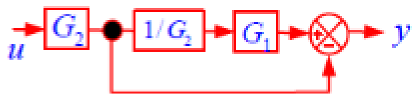
1.4.1 ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन तंत्राचे फायदे / गरज:

1. **सिम्पलिफिकेशन:** विझ्युअल गोंधळ (Visual clutter) कमी होतो, ज्यामुळे सिस्टिमचे रेप्रेसेंटेशन अधिक मॅनेजेबल होते. एकाच समान ब्लॉकमध्ये अनेक ब्लॉक्स एकत्र होतात, एकंदर रचना सोपी होते.
2. **इम्प्रोव्हड अंडरस्टॅण्डिंग:** स्पष्टता वाढवते, सिस्टिमची कार्यक्षमता आणि सिग्नल फ्लो समजून घेणे सोपे होते. अभियंते आणि भागधारकांना सिस्टिमचे बिहॅवियर लवकर समजून घेण्यास सक्षम करते.
3. **इफिशिएंट ॲनालीसिस** (विश्लेषण): स्टॅबिलिटी, ट्रान्सफर फंक्शन आणि टाइम रिस्पॉन्स यासारख्या सिस्टिम वैशिष्ट्यांचे विश्लेषण करण्याची प्रक्रिया सोपी करते. विश्लेषणासाठी गणिती साधने आणि तंत्रे वापरणे सोपे करते.
4. **डिझाइन आणि सिंथेसिस सोपे करते:** सिस्टिम संरचना सुधारण्यासाठी ब्लॉक डायग्रॅमची सोपी हाताळणी इनॅबल करते. रिपीटेटिव्ह डिझाइन प्रक्रिया आणि सिस्टिम परफॉर्मन्स ऑप्टिमायझेशनला सपोर्ट करते.
5. **(ट्रबलशूटिंग) समस्या निवारण:** सिस्टिममधील समस्याग्रस्त घटक किंवा कनेक्शन वेगळे करण्यास मदत करते. सिस्टिमच्या अपयश ओळखण्याची आणि सोडवण्याची प्रक्रिया सोपी करते.
6. **सुधारित कम्युनिकेशन:** सिस्टिमचे स्पष्ट आणि संक्षिप्त रेप्रेसेंटेशन देते, जे टीम सदस्य आणि स्टेकहोल्डर्सला शेअर करता येईल आणि समजून घेता येईल.

टेबल 1.5

ब्लॉक डायग्राम अल्जेब्रासाठी नियम:

रुल	मूळ आकृती	समतुल्य आकृती
कॅस्केडमध्ये ब्लॉक एकत्र करणे		

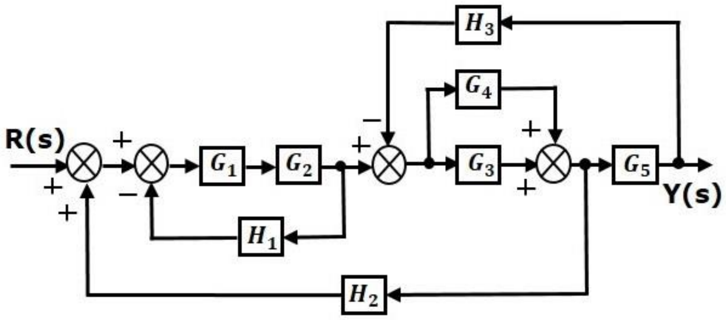
रुल	मूळ आकृती	समतुल्य आकृती
समांतर ब्लॉक एकत्र करणे		
ब्लॉकच्या मागे पिक ऑफ पॉईंट हलविणे		
ब्लॉकच्या पुढे पिक ऑफ पॉईंट हलविणे		
ब्लॉकच्या मागे एक समिंग पॉईंट हलविणे		
ब्लॉकच्या पुढे एक समिंग पॉईंट हलविणे		 

ब्लॉक डायग्राम सोपी (कमी) करण्यासाठी आणखी काही नियम, ज्यात बरेच ब्लॉक्स, समिंग पॉईंट्स आणि टेक-ऑफ पॉईंट्स आहेत:

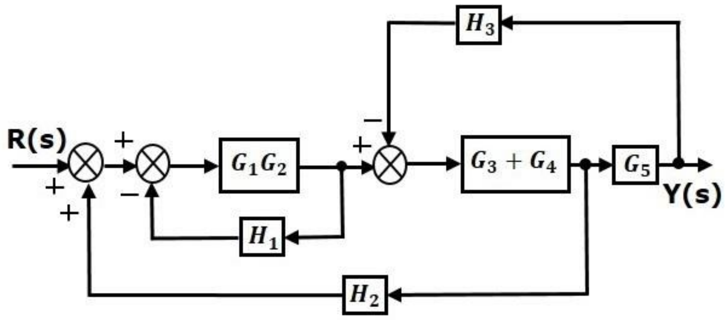
नियम 1 - सिरिजमध्ये जोडलेले ब्लॉक तपासा आणि सोपे करा.
नियम २ - पॅरेलल जोडलेले ब्लॉक तपासा आणि सोपे करा.
नियम 3 - फीडबॅक लूपमध्ये जोडलेले ब्लॉक तपासा आणि सोपे करा.
नियम ४ - सिम्प्लिफाय करताना टेक-ऑफ पॉईंटमध्ये अडचण येत असेल तर उजवीकडे हलवा.
नियम ५ - सोपा करताना समिंग पॉईंटची अडचण येत असेल तर तो डावीकडे हलवावा.
नियम ६ - सोपा फॉर्म मिळेपर्यंत म्हणजे सिंगल ब्लॉक मिळेपर्यंत वरील स्टेप रिपीट करा.
एकाच ब्लॉकमध्ये प्रेसेंट असलेले ट्रान्सफर फंक्शन म्हणजे ओव्हरऑल ब्लॉक डायग्रामचे ट्रान्सफर फंक्शन आहे.

1.4.3 ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्नीकचे उदाहरण:

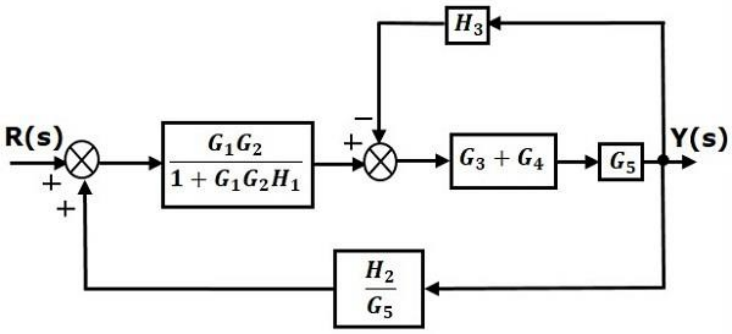
खालील आकृतीमध्ये दर्शविलेल्या ब्लॉक डायग्रामचा विचार करा. ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्निकचा वापर करून आपण ही ब्लॉक डायग्राम सोपी (कमी) करूया.



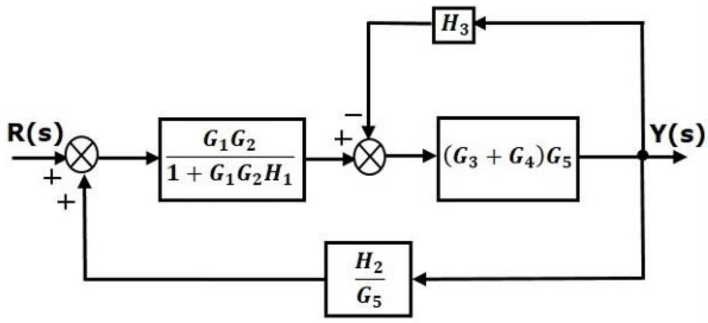
स्टेप 1 - ब्लॉक G_1 आणि G_2 साठी नियम 1 वापरा. ब्लॉक G_3 आणि G_4 साठी नियम 2 वापरा. मॉडिफाइड ब्लॉक डायग्राम खालील आकृतीमध्ये दर्शविली आहे.



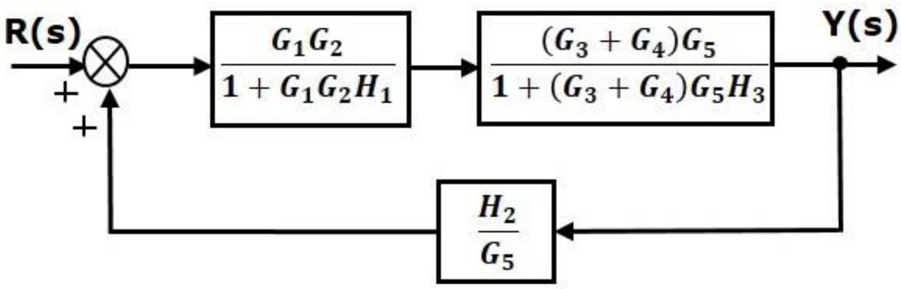
स्टेप 2 – G_1 G_2 आणि H_1 ब्लॉकसाठी नियम 3 वापरा. ब्लॉक G5 नंतर टेक-ऑफ पॉईंट शिफ्ट करण्यासाठी नियम 4 वापरा. सुधारित ब्लॉक डायग्राम खालील फिगरमध्ये दर्शविली आहे.



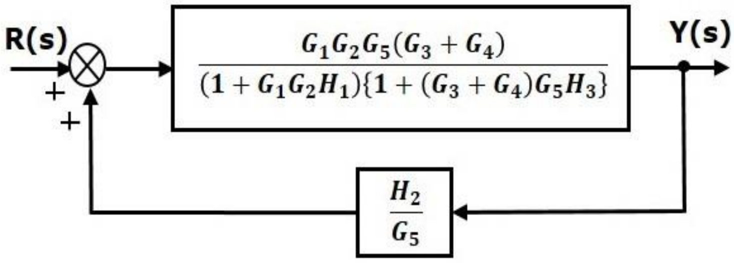
स्टेप 3 – ब्लॉक (G_3 + G_4) आणि G_5 साठी नियम 1 वापरा. सुधारित ब्लॉक डायग्राम खालील फिगरमध्ये दर्शविली आहे.



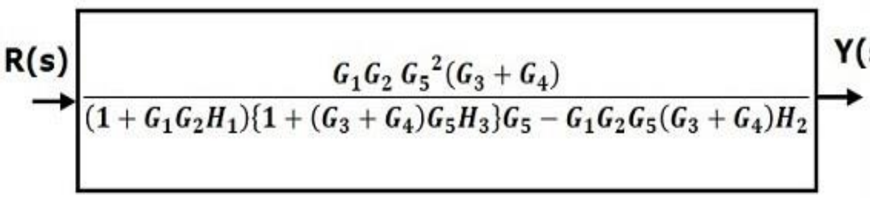
स्टेप 4 – ब्लॉक (G_3 + G_4) G_5 आणि H3 साठी नियम 3 वापरा. सुधारित ब्लॉक डायग्राम खालील फिगरमध्ये दर्शविली आहे.



स्टेप 5 – सिरिजमध्ये जोडलेल्या ब्लॉक्ससाठी नियम 1 वापरा. सुधारित ब्लॉक डायग्राम खालील फिगरमध्ये दर्शविली आहे.



स्टेप 6 – फीडबॅक लूपमध्ये जोडलेल्या ब्लॉक्ससाठी नियम 3 वापरा. सुधारित ब्लॉक डायग्राम खालील फिगरमध्ये दर्शविली आहे. हि सोपी ब्लॉक डायग्राम आहे.

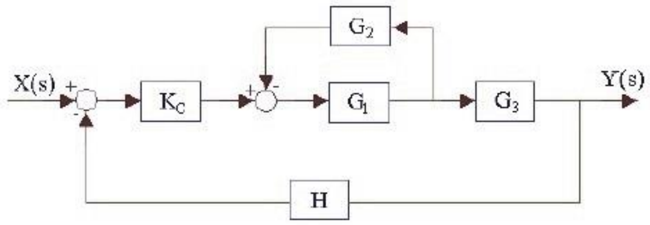


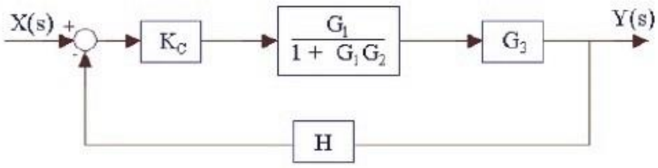
म्हणून, या सिस्टिमचे ट्रान्सफर फंक्शन आहे
ट्रान्सफर फंक्शन **= Y(s) / R(s) =**

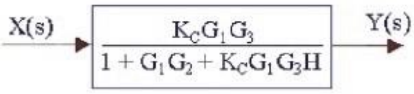
$$\frac{G_1G_2\,G_5{}^2(G_3+G_4)}{(1+G_1G_2H_1)\{1+(G_3+G_4)G_5H_3\}G_5-G_1G_2G_5(G_3+G_4)H_2}$$

ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्नीकच्या प्रक्रियेस गुंतागुंतीच्या सिस्टिमसाठी अधिक वेळ लागतो. कारण, त्यासाठी प्रत्येक टप्प्यानंतर (पार्टीअल्ली सिम्पलीफाईड) ब्लॉक डायग्राम काढणे आवश्यक आहे.

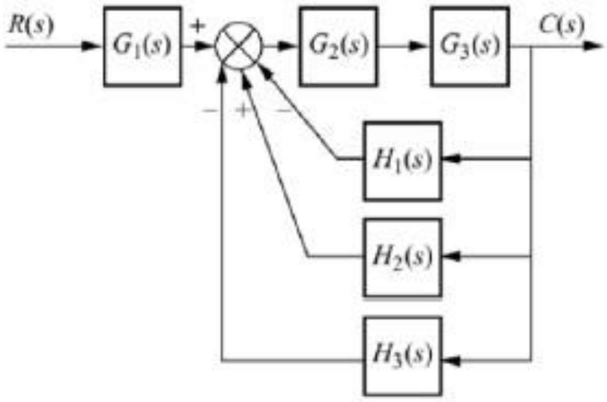
प्रॉब्लेम 1. ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्निकचा वापर करून प्रॉब्लेम सोडवा:



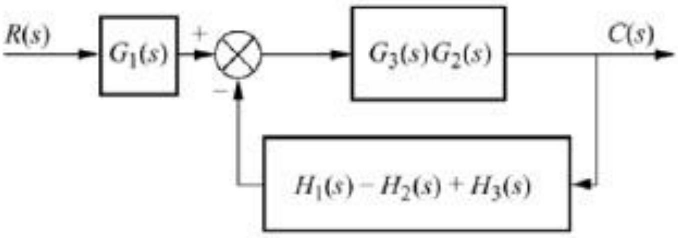




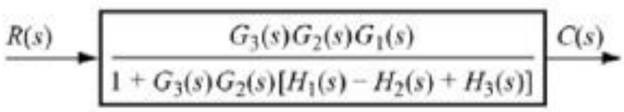
प्रॉब्लेम 2. ब्लॉक डायग्राम रिडक्शन टेक्निकचा वापर करून प्रॉब्लेम सोडवा:



(a)



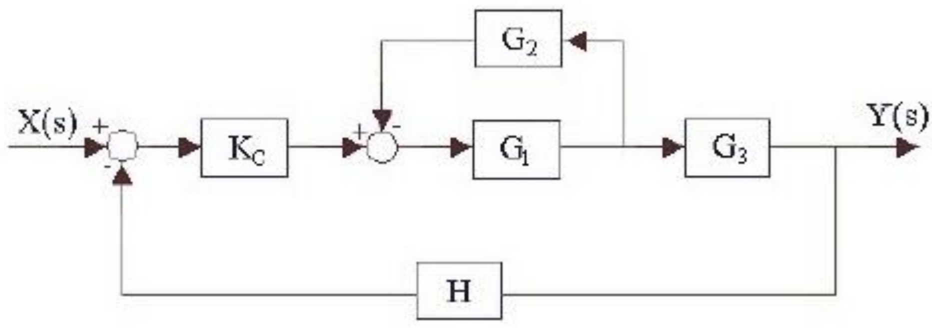
(b)



(c)

Questions

1. Define control system. [R]
2. State different elements of control system. [U]
3. Draw the block diagram of control system. [A]
4. State the purpose of a controller and feedback element in a control system.[U]
5. Write any four examples of control systems. [R]
6. Explain open-loop control system with block diagram. [U]
7. Give any four real-world examples of open-loop and closed-loop control system with proper justification. [A]
8. Explain closed-loop control system with block diagram. [U]
9. Compare open-loop and closed-loop control systems on basis of i) components, ii) accuracy, iii) stability and iv) linearity. [A]
10. Explain Time-variant and Time-invariant control system. [U]
11. Write any four examples of Time-variant control system. [R]
12. Compare Non-linear control system with linear control system on basis of i) Relationship, ii) behavior and iii) analysis. [A]
13. Explain Transfer function in a control system [U]
14. Obtain the transfer function of RLC network. [A]
15. Obtain transfer function of RC network. [A]
16. State the importance of transfer function in control systems. [U]
17. Explain the relationship between input and output in the Laplace domain using a transfer function. [U]
18. Explain transfer function for RC, RL circuit using Laplace transform. [U]
19. Explain block reduction technique. [U]
20. Write the benefits of block reduction technique. [A]
21. Write any four rules used in block diagram reduction technique. [R]
22. Explain the need of block diagram reductions techniques. [U]
23. State any four practical applications of control system. [U]
24. Simplify the problem using block diagram reduction technique. [A]



Unit 2 Time Domain Analysis
टाइम डोमेन ॲनालिसिस

विषय निष्पत्ती (CO): स्टँडर्ड इनपुट सिग्नलसाठी दिलेल्या कंट्रोल सिस्टिमचे विश्लेषण करा

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

TLO 2.1 दिलेल्या कंट्रोल सिस्टिमचे टाइम रिस्पॉन्स काढणे

TLO 2.2 स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्सची त्याच्या लाप्लास ट्रान्सफॉर्मसहित लिस्ट करा.

TLO 2.3 फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिमचा टाइम रिस्पॉन्स काढणे.

TLO 2.4 सेकंड ऑर्डर सिस्टिमची डायग्राम काढणे.

2.1 टाइम डोमेन ॲनालिसिस (Time Domain Analysis) - कंट्रोल सिस्टिम दोन प्रकारच्या अवस्थांमध्ये काम करते. एक म्हणजे ट्रान्झिएंट (Transient) म्हणजेच बदलत्या स्थितीतील (डायनामिक) आणि दुसरी स्टेडी स्टेट (Steady State) म्हणजेच स्थिर स्थिती. या दोन्ही अवस्थांमध्ये सिस्टिम कशी वागते याचा अभ्यास करण्याला टाइम रिस्पॉन्स (Time Response) म्हणतात.

सिस्टिमचा अभ्यास करताना पहिलं पाऊल म्हणजे त्या सिस्टिमचं मॅथेमॅटिकल मॉडेल (Mathematical Model) तयार करणे. यानंतर, जर आपल्याला कुठलाही ठराविक इनपुट सिग्नल (Input Signal) दिला तर, त्याचा पूर्ण टाइम रिस्पॉन्स (Time Response) कसा असेल हे काढण्यासाठी लाप्लास ट्रान्सफॉर्म इनव्हर्जन (Laplace Transform Inversion) वापरतात.

टाइम रिस्पॉन्स: सिस्टिमला दिलेल्या एक्सायटेशन (Excitation) मुळे सिस्टिमचीजी प्रतिक्रिया (रिस्पॉन्स – Response) येते आणि जो वेळेनुसार बदलतो, त्याला त्या सिस्टिमचा टाइम रिस्पॉन्स (Time Response) म्हणतात.

Fig. 2.1

टाईप्स ऑफ टाइम रिस्पॉन्स

समजून घेण्यासाठी आपण ॲनालॉग ॲमीटर (Analog Ammeter) चं उदाहरण पाहू. मानूया की आपण त्याला 5A करंट (Current) दिला. ॲमीटरचं सुई (Pointer) लगेचच 5A दाखवत नाही, त्याला काही वेळ लागतो. त्या वेळेत सुई थोडीफार इकडे-तिकडे हलते, जसे की 5.2A, 4.8A, 5.1A, 4.9A असे वेगवेगळे वाचने (Readings) दाखवते आणि शेवटी 5A वर स्थिर होते. सुईने स्थिर होण्यापूर्वी घेतलेली ही हलचाल (Deflection) आणि त्यातील बदल ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient Response) म्हणून ओळखला जातो. तर, शेवटी मिळणारा स्थिर आउटपुट (Output) म्हणजे स्टेडी स्टेट रिस्पॉन्स (Steady State Response) आहे.

2.1.1 ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient response): सिस्टिमला अंतिम मूल्य मिळेपर्यंत आउटपुटमध्ये होणारे बदल (आउटपुट व्हारिएशन- Output Variation) याला ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient Response) म्हणतात.

ॲमीटरच्या सुईला (Pointer) अचूक मूल्य मिळवण्यासाठी लागणारा वेळ ट्रान्झिएंट टाइम (Transient Time) असतो. ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient Response) हा कधी हळूहळू कमी होणारा (Exponential) किंवा आवार-उतार करणारा (Oscillatory) असतो आणि तो Ct(t) ने दर्शवला जातो.

$$\lim_{t \to \infty} C_t\,(t) = 0$$

2.1.2 स्टेडी स्टेट रिस्पॉन्स (Steady state response): ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient Response) संपल्यानंतर जे उरते, त्याला स्टेडी स्टेट रिस्पॉन्स (Steady State Response) म्हणतात. हे साधारणपणे सिस्टिमने शेवटी मिळवलेले अंतिम मूल्य असते. याला Css(t) ने दर्शवले जाते. स्टेडी स्टेट रिस्पॉन्स (Steady State Response) मधून एरर (Error) बद्दल माहिती मिळते, म्हणजेच डिझायर्ड आउटपुट (Desired Output) आणि ॲक्च्युअल आउटपुट (Actual Output) यामधला फरक समजतो. यातून एरर (Error) कायम स्थिर (constant) आहे का वेळेनुसार बदलतो, याचीही माहिती मिळते.

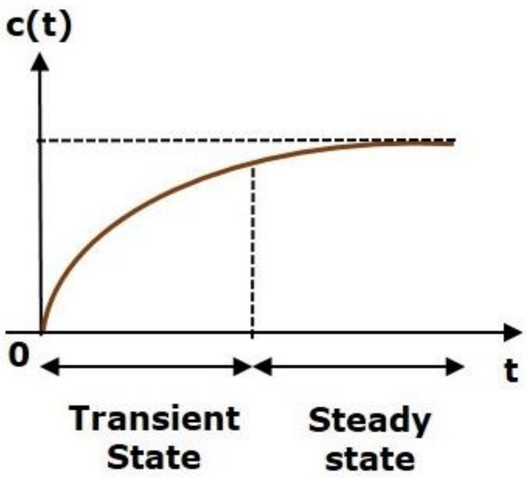


Fig.2.2
ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन ऑफ टाइम रिस्पॉन्स
)Graphical representation of Time Response(

त्यामुळे टोटल टाइम रिस्पॉन्स (Total Time Response) हा खालीलप्रमाणे मिळतो.

$$C(t) = C_{ss} + C_t(t)$$

उदाहरणार्थ (Example(
कंट्रोल सिस्टिम (Control System) च्या टाइम रिस्पॉन्स (Time Response) मधील ट्रान्झिएंट (Transient) आणि स्टेडी स्टेट टर्म्स (Steady State Terms) शोधूया.

$$C(t) = 5 + 2e^{-t}$$

इथे, दुसरा भाग $2e^{-t}$ हा t = (infinity) असल्यावर '0' होतो. म्हणून हाच ट्रान्झिएंट टर्म (Transient Term) आहे. आणि पहिला भाग '5', t इंफिनिटी (infinity) जरी झाले तरी तसाच राहतो. म्हणून हाच स्टेडी स्टेट टर्म (Steady State Term) आहे.

नोंद: डिझायर्ड आउटपुट **(**Desired Output**)** आणि अॅक्च्युअल आउटपुट **(**Actual Output**)** मधला फरक स्टेडी स्टेट एरर **(**Steady State Error (e_{ss})**)** म्हणून ओळखला जातो. हे सिस्टिमची अचूकता **(**Accuracy**)** दर्शवते.

2.1.3 कॉन्सेप्ट ऑफ पोल्स आणि झिरोज (Concept of Poles & Zeros) : ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function): आउटपुटचा लाप्लास ट्रान्सफॉर्म **(**Laplace Transform of Output**)** आणि इनपुटचा लाप्लास ट्रान्सफॉर्म **(**Laplace Transform of Input**)** यांचे गुणोत्तर, '0' इनिशियल कंडिशन्स **(**Zero Initial Conditions**)** गृहीत धरून, याला ट्रान्सफर फंक्शन **(**Transfer Function**)** म्हणतात. ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function) हे फ्रिक्वेन्सी डोमेन (Frequency Domain) मधील एक गणितीय सादरीकरण आहे, जे 'एस' पॉलिनोमियल ('s' Polynomial) च्या प्रमाणाच्या मदतीने दर्शवले जाते. i.e. ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer function) =

$$G(s) = \frac{Z(s)}{P(s)}$$

This transfer function can be expressed as given below:

$$G(s) = \frac{a_0 S^m + a_1 S^{m-1} + a_2 S^{m-2} + a_3 S^{m-3} + \cdots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots + a_m}{b_0 S^n + b_1 S^{n-1} + b_2 S^{n-2} + b_3 S^{n-3} + \cdots \ldots \ldots \ldots \ldots + b_n}$$

The numerator and denominator can be factorised:

$$G(s) = \frac{a_0 (s - Z_1)(s - Z_2)(s - Z_3) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (s - Z_m)}{b_0 (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \ldots \ldots \ldots \ldots (s - P_n)}$$

If,

$$K = \frac{a_0}{b_0}$$

Then, Transfer Function = G(s)

$$G(s) = K \frac{(s - Z_1)(s - Z_2)(s - Z_3) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (s - Z_m)}{(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \ldots \ldots \ldots \ldots (s - P_n)}$$

Where, K is called gain factor.

2.1.4 पोल्स ऑफ ट्रान्सफर फंक्शन (Poles of transfer function):

ट्रान्सफर फंक्शनचे पोल्स (Poles of a Transfer Function) हे असे असतात:

1. असे 'एस' चे व्हॅल्यूज (Values of s) जे ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function) ला (infinity) करतात.
2. ट्रान्सफर फंक्शनच्या (Transfer Function) डिनॉमिनेटरचे रूट्स (Roots of the Denominator) जे न्युमिरेटरच्या रूट्स (Roots of the Numerator) बरोबर असतात.

ट्रान्सफर फंक्शन)Transfer Function(= G(s)

$$G(s) = \frac{a_0 (s - Z_1)(s - Z_2)(s - Z_3) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (s - Z_m)}{b_0 (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \ldots \ldots \ldots \ldots (s - P_n)}$$

सिस्टिमचे पोल्स **(**Poles of the System**)** म्हणजे ट्रान्सफर फंक्शनच्या **(**Transfer Function**)** डिनॉमिनेटर पॉलिनोमियलचे रूट्स **(**Roots of the Denominator Polynomial**).**

उदा. वरील ट्रान्सफर फंक्शन G(s) मध्ये P1, P2,... Pn हे सिस्टिमचे पोल्स **(**Poles of the System**)** आहेत. हे असे 'एस' चे व्हॅल्यूज **(**Values of s**)** असतात जे ट्रान्सफर फंक्शनला इंफिनिटी (infinity) करतात**,** जेव्हा ते डिनॉमिनेटरमध्ये सबस्टिट्यूट केले जातात.

डेफिनिशन: वरील ट्रान्सफर फंक्शन इक्वेशनमध्ये**,** असे पॉलिनोमियल व्हॅल्यूज **(**Polynomial Values**)** जे ट्रान्सफर फंक्शन इंफिनिटी (infinity) करतात**,** त्यांना ट्रान्सफर फंक्शनचे पोल्स **(**Poles of Transfer Function**)** म्हणतात.

उदा. जर आपण s = P1, P2,… Pn सबस्टिट्यूट केले, तर वरील इक्वेशनमध्ये ट्रान्सफर फंक्शन इंफिनिटी (infinity) होतो.

म्हणून P1, P2,… Pn यांना ट्रान्सफर फंक्शनचे पोल्स (Poles of Transfer Function) म्हणतात.

जर ट्रान्सफर फंक्शनचा डिनॉमिनेटर '0' बरोबर इक्वेट केला, म्हणजेच,

i.e. $(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \dots \dots \dots \dots (s - P_n) = 0$

तर या इक्वेशनचे रूट्स म्हणजेच ट्रान्सफर फंक्शनचे पोल्स **(**Poles of Transfer Function**)** असतात.

उदाहरण: जर एखाद्या सिस्टिमचा ट्रान्सफर फंक्शन खालीलप्रमाणे दिला असेल,

$$G(s) = \frac{s(s+2)(s+4)}{s(s+3)(s+4)}$$

म्हणून पोल्स काढण्यासाठी डिनॉमिनेटर '0' बरोबर इक्वेट करावा लागतो.

उदा.

s (s+3) (s+4) = 0

वरील व्हॅल्यूज ट्रान्सफर फंक्शनला (infinity) करतात**,** त्यामुळे या ट्रान्सफर फंक्शनचे तीन पोल्स आहेत. म्हणजेच कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशन **(**Characteristic Equation**)** नुसार**, s** = **0, s** = -3 आणि **s** = -4 हे ट्रान्सफर फंक्शनचे पोल्स आहेत.

ट्रान्सफर फंक्शनचे झिरोज (Zeros of Transfer Function) हे असे असतात:

1. असे 'एस' चे व्हॅल्यूज (Values of s) जे ट्रान्सफर फंक्शनला '0' करतात.
2. ट्रान्सफर फंक्शनच्या न्युमिरेटरचे रूट्स (Roots of the Numerator) जे डिनॉमिनेटरच्या रूट्स (Roots of the Denominator) बरोबर असतात.

Transfer Function = G(s)

$$G(s) = \frac{a_0(s - Z_1)(s - Z_2)(s - Z_3) \dots \dots \dots \dots \dots \dots (s - Z_m)}{b_0(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \dots \dots \dots \dots (s - P_n)}$$

ट्रान्सफर फंक्शनचे झिरोज (Zeros of Transfer Function) म्हणजे न्युमिरेटर पॉलिनॉमियलचे रूट्स असतात.

उदा. वरील ट्रान्सफर फंक्शन G(s) मध्ये, Z1, Z2,… Zm हे सिस्टिमचे झिरोज आहेत. हे असे एस (s(चे व्हॅल्यूज असतात, जे न्युमिरेटरमध्ये सबस्टिट्यूट केल्यावर ट्रान्सफर फंक्शन '0' होते.

वरील ट्रान्सफर फंक्शन इक्वेशनमध्ये, जे व्हॅल्यूज ट्रान्सफर फंक्शन '0' करतात, त्यांना ट्रान्सफर फंक्शनचे झिरोज म्हणतात.

उदा. जर आपण s = Z1, Z2,… Zn सबस्टिट्यूट केले,

तर वरील इक्वेशनमध्ये ट्रान्सफर फंक्शन '0' होतो.

म्हणून Z1, Z2,… Zn यांना झिरोज ऑफ ट्रान्सफर फंक्शन म्हणतात.

जर ट्रान्सफर फंक्शनचा न्युमिरेटर ‘0’ बरोबर इक्वेट केला, म्हणजेच, i.e.
$(s - Z_1)(s - Z_2) \dots \dots . . (s - Z_n) = 0$
तर या इक्वेशनचे रूट्स म्हणजेच झिरोज ऑफ ट्रान्सफर फंक्शन असतात.
उदाहरण: जर सिस्टिमचा ट्रान्सफर फंक्शन खालीलप्रमाणे दिला असेल,

$$G(s) = \frac{s(s+2)}{s(s+3)(s+5)}$$

तर झिरोज (Zeros) मिळवण्यासाठी न्युमिरेटरला 0 बरोबर इक्वेट करतो. i.e. $s(s+2) = 0$
वरील व्हॅल्यूज ट्रान्सफर फंक्शन ‘0’ करतात, त्यामुळे हे ट्रान्सफर फंक्शनचे झिरोज आहेत.
म्हणजेच s = 0 and s = -2 हे दोन झिरोज ऑफ ट्रान्सफर फंक्शन आहेत.

2.1.5 Poles and Zeros of a First-Order System: An Example

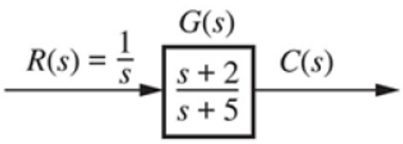


Fig. 2.3 (a)
सिस्टीम शोईंग इनपुट आणि आउटपुट
)System showing input and output(

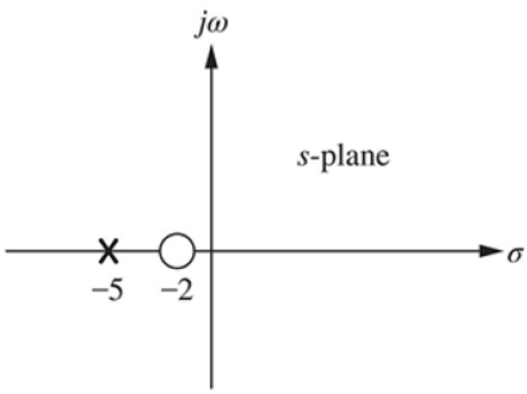


Fig. 2.3 (b)
पोल-जीरो प्लॉट ऑफ द सिस्टीम
)pole-zero plot of the system(

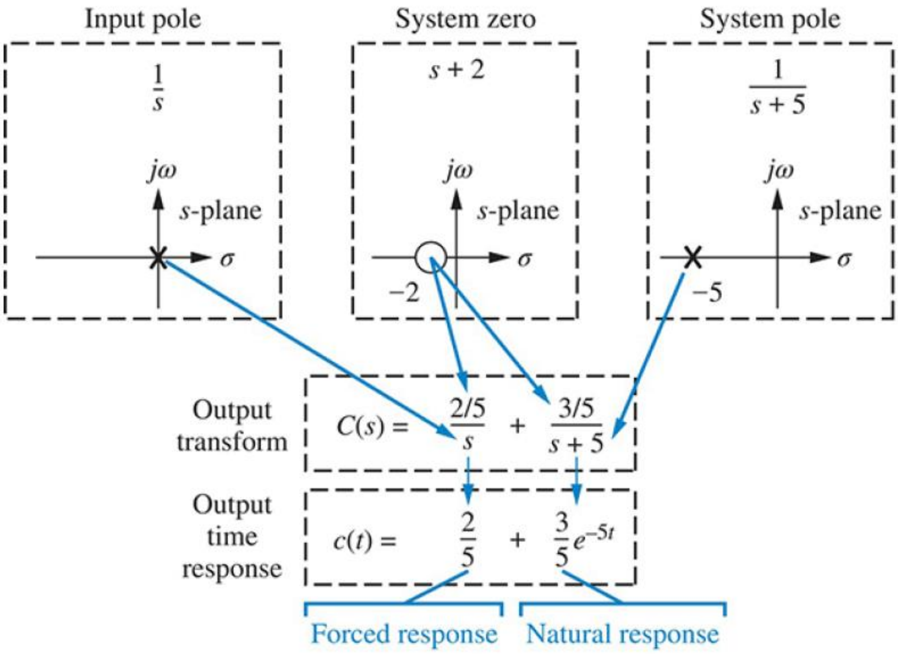


Fig. 2.3 (c)
एवोलुशन ऑफ अ सिस्टीम रिस्पॉन्स (evolution of a system response.(

(एवोलुशन ऑफ अ सिस्टीम रिस्पॉन्स जेनेरेटेड बाय पोल व जीरो बघण्यासाठी ब्लू अरोजला फॉलो करा (Follow blue arrows to see the evolution of the response component generated by the pole or zero.)

दिलेल्या ट्रान्सफर फंक्शन G(s) मध्ये, s = -5 वर पोल (Pole) आणि s = -2 वर झिरो (Zero) आहे.
ही व्हॅल्यूज कॉम्प्लेक्स एस (s(-प्लेनवर प्लॉट केल्या जातात, जिथे '×' हे पोलसाठी (Pole) आणि '○' हे झिरोसाठी (Zero) वापरले जाते.
पोल आणि झिरोचे गुणधर्म (Properties) समजून घेण्यासाठी, युनिट स्टेप रिस्पॉन्स (Unit Step Response) काढूया.
त्यासाठी, फिगर 2.3 (a) मधील ट्रान्सफर फंक्शनला स्टेप फंक्शनने (Step Function) गुणिले जाते.

$$C\,(s) = \frac{(s+2)}{s(s+5)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+5} = \frac{\frac{2}{5}}{s} + \frac{\frac{3}{5}}{s+5}$$

….(2.1)

Where,

$$A = \frac{(s+2)}{(s+5)}|s \to 0 \;\; = \frac{2}{5}$$

$$B = \frac{(s+2)}{s}|s \to -5 \;\; = \frac{2}{5}$$

Thus,

$$C(t) = \frac{2}{5} + \frac{3}{5}\, e^{-5t}$$

…………………….(2.2)

इनपुट फंक्शनचा पोल (Pole) हा फोर्स्ड रिस्पॉन्स (Forced Response) तयार करतो. उदाहरणार्थ, s = 0 वरील पोलने आउटपुटमध्ये स्टेप फंक्शन (Step Function) निर्माण केले.
ट्रान्सफर फंक्शनचा पोल हा नॅचरल रिस्पॉन्स (Natural Response) तयार करतो. उदाहरणार्थ, s = -5 वरील पोलने आउटपुटमध्ये e^{-5t} तयार केले.
रिअल ऍक्सिस (Real Axis) वरील पोल हा $e^{-\alpha t}$ या स्वरूपात एक्स्पोनेंशियल (Exponential) रिस्पॉन्स तयार करतो, जिथे '-α' हा पोलचा रिअल ऍक्सिसवरील लोकेशन असतो. '→' जर पोल रिअल ऍक्सिसवर डावीकडे जास्त लांब असेल, तर ट्रान्झियंट रिस्पॉन्स (Transient Response) लवकर '0' होईल. (उदा. s = -5 ने e^{-5t} तयार केले.)
झिरो (Zero) आणि पोल (Pole) हे फोर्स्ड आणि नॅचरल रिस्पॉन्सची अम्प्लिट्यूड (Amplitude) ठरवतात.
→ हे समीकरण (2.1) मध्ये A आणि B च्या गणनेतून समजते.

2.1.6 कॅरॅक्टरिस्टिक इक्वेशन (CharacteristicEquation): ट्रान्सफर फंक्शनच्या डिनॉमिनेटरला (Denominator) '0' बरोबर ठेवून मिळणाऱ्या समीकरणाला कॅरॅक्टरिस्टिक इक्वेशन.म्हणतात. या समीकरणाच्या रूट्स (Roots) म्हणजे त्या सिस्टिमचे पोल्स (Poles) असतात.

$$F(s) = b_0S^n + b_1S^{n-1} + b_2S^{n-2} + b_3S^{n-3} + \cdots \ldots \ldots \ldots \ldots . . + b_n = 0$$

हे कॅरॅक्टरिस्टिक इक्वेशन (characteristic equation) आहे.

2.1.6 एस प्लेन रीप्रेजेंटेशन (S-Plane Representation): S-Plane (S-प्लेन) किंवा Complex Frequency Plane (कॉम्प्लेक्स फ्रिक्वेन्सी प्लेन) हा एका ग्राफसारखा असतो, जो एका कॉम्प्लेक्स (Complex) संख्येच्या रिअल (Real) आणि इमॅजिनरी (Imaginary) भागांमध्ये विभाजित केला जातो.

- X-अक्षावर (X-Axis) रिअल भाग (Real Part) दाखवला जातो आणि त्याला σ (sigma - सिग्मा) ने दर्शवले जाते.
- Y-अक्षावर (Y-Axis) इमॅजिनरी भाग (Imaginary Part) दाखवला जातो आणि त्याला jω (j ओमेगा - जे ओमेगा) ने दर्शवले जाते.

कॉम्प्लेक्स संख्येसाठी वापरण्यात येणारे समीकरण (गणिती वाक्य) s = σ + jω असे लिहिले जाते. याचा अर्थ, एस (S(-प्लेनवरील कोणत्याही बिंदूला (Point) σ आणि ω या जोडीतून दाखवता येते.

एस प्लेन (S-Plane(मधील विभाग:

- jω अक्षाच्या डाव्या बाजूला (Left Side) असलेला भाग Left Half Plane (LHP - लेफ्ट हाफ प्लेन) म्हणतात.
- jω अक्षाच्या उजव्या बाजूला (Right Side) असलेला भाग Right Half Plane (RHP - राइट हाफ प्लेन) म्हणतात.

एस (S(-प्लेनचा उपयोग कंट्रोल सिस्टिमच्या गुणधर्मांचे (Behaviour) ग्राफच्या मदतीने विश्लेषण करण्यासाठी केला जातो. कंट्रोल सिस्टिमच्या स्थिरतेसाठी (Stability) या एस)S(-प्लेनवरील पोल्स)Poles(कुठे आहेत, यावर अवलंबून असते.

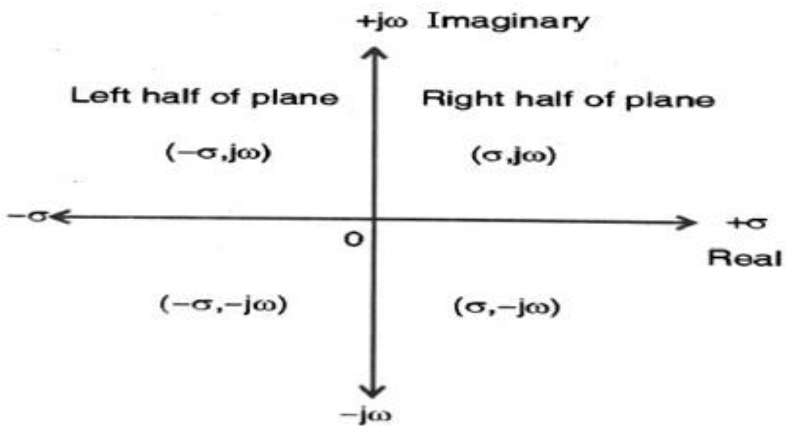


Fig.2.4
एस प्लेन रीप्रेजेंटेशन
(S-plane representation)

2.1.5 ऑर्डर ऑफ सिस्टीम (Order of system(: कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन (Characteristic Equation) मधील '**s**' चा सर्वात मोठा घातांक हा सिस्टिमचा ऑर्डर (Order) दर्शवतो. इलेक्ट्रिकल सर्किटमध्ये, एनर्जी स्टोअरिंग डिव्हाइसेस (Energy Storing Devices) जसे की इंडक्टर (Inductor) आणि कॅपेसिटर (Capacitor) यांची संख्या सिस्टिमच्या ऑर्डरशी संबंधित असते. उदाहरण: जर एखाद्या सिस्टिमसाठी ट्रान्सफर फंक्शन खालीलप्रमाणे दिले असेल:

$$T.F. = \frac{s(s+2)}{s^4 + 7s^3 + 10s^2 + 5s + 5}$$

क्लोज लूप ट्रान्सफर फंक्शन (Close Loop Transfer Function) च्या डिनॉमिनेटर (Denominator) मधील **s** चा सर्वात मोठा घातांक (Highest Power) 4 आहे.

म्हणून ही 4th ऑर्डर सिस्टिम (4th Order System) आहे.

Numericals: 1] Calculate the order & Type of given system:

$$G(s) = \frac{(s+2)(s+5)}{s(s+3)(s+4)}$$

ANS:

$$C\,(s) = \frac{(s+2)(s+5)}{s(s+3)(s+4)}$$

वरील ट्रान्सफर फंक्शन्स (Transfer Functions) मधून मिळणारे पोल्स (Poles) म्हणजे s = 0, -3, -4 आहेत.

सिस्टिमचा (System) टाइप (Type) हा s = 0 वर असलेल्या पोल्सच्या संख्येवर ठरवला जातो. इथे एक पोल (Pole) s = 0 वर आहे.

म्हणून याला टाइप 1 सिस्टिम (Type 1 System) म्हणतात.

सिस्टिमचा ऑर्डर (Order of the System) म्हणजे कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन (Characteristic Equation) मधील 's' चा सर्वात मोठा घातांक (Highest Power) असतो.

म्हणून: s (s+3) (s+4)

$$= (s^2 + 3s)(s+4)$$
$$= s^3 + 3s^2 + 4s^2 + 12s$$
$$= s^3 + 7s^2 + 12s$$

इथे **'s'** चा सर्वात मोठा घातांक (Higest Power) 3 आहे.

म्हणून, दिलेल्या सिस्टिमचा ऑर्डर (Order of the System) = 3 आहे.

2] For given transfer function

$$G(s) = \frac{(s+2)(s+5)}{s(s+3)(s+4)}$$

Find: (i) Poles (ii) Zeros (iii) Characteristic equation (iv) Pole Zero plot

ANS:

$$G(s) = \frac{(s+2)(s+5)}{s(s+3)(s+4)}$$

Poles (पोल्स): पोल्स हे समीकरणाच्या त्या मूळसंख्या (roots) आहेत ज्या डिनॉमिनेटर (Denominator) ला **'0'** समकक्ष (equal) ठेवल्यावर मिळतात.

उदा. **s (s+3)(s+4) = 0**

म्हणून, **Poles = S = 0, S = -3, S = -4**

Zeros (झिरोज): झिरोज हे समीकरणाच्या त्या मूळसंख्या आहेत ज्या न्यूमरेटर (Numerator) ला **'0'** समकक्ष (equal) ठेवल्यावर मिळतात.

उदा. **(s+2)(s+5) = 0**

Characteristic Equation (कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन): हे डिनॉमिनेटर (Denominator) ला **'0'** समकक्ष (equal) ठेवल्यावर मिळते.

उदा. **s (s+3)(s+4) = 0**

$(s^2 + 3s)(s + 4) = 0$

$s^3 + 3s^2 + 4s^2 + 12s = 0$

⇒ **$s^3 + 7s^2 + 12s = 0$** हे कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन (Characteristic Equation) आहे.

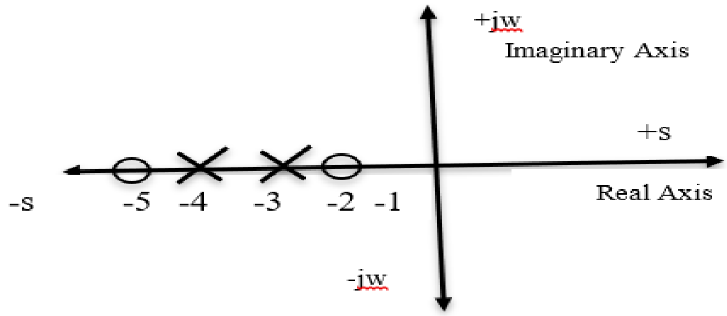


Fig.2.5

पोल – जीरो प्लॉट

(Pole – Zero Plot)

2.2 स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्स (सिग्नल) Standard Test Inputs (Signals): एका सिस्टिमचा रिस्पॉन्स (Response) जाणून घेण्यासाठी इनपुट सिग्नल (Input Signal) ची माहिती असणे आवश्यक आहे. कोणतीही नवीन सिस्टिम (System) प्रथम वेगवेगळ्या इनपुट सिग्नल्स (Input Signals) सोबत तपासली जाते आणि त्या इनपुट्सला दिलेला रिस्पॉन्स (Response) पाहिला जातो. सिस्टिमचे मूल्यमापन, या इनपुट्स (Inputs) ला दिलेल्या रिस्पॉन्स (Response) वर आधारित केले जाते. हे इनपुट्स स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्स (Standard Test Inputs) म्हणून ओळखले जातात.

एकदा सिस्टिमने टेस्ट इनपुट्स (Test Inputs) साठी समाधानकारक वर्तन (Behavior) दाखवले की, त्यानंतरच ती प्रत्यक्ष वापरात आणली जाते.

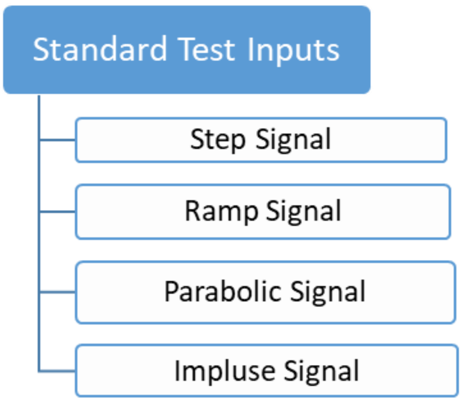


Fig.2.6

टाईप्स ऑफ स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्स (सिग्नल)

Types of Standard Test Inputs (Signals)

2.2.1 स्टेप सिग्नल (Step Signal) (पोजीशन फंक्शन - Position Function): स्टेप सिग्नल (Step Signal) हा असा सिग्नल (Signal) आहे, ज्याचे मूल्य ‘0’ वेळेत ($t = 0$) एका पातळीवरून (साधारणतः ‘0’ वरून) दुसऱ्या पातळीवर A पर्यंत बदलते आणि $t > 0$ साठी A वर स्थिर राहते.

युनिट स्टेप (Unit Step) हा स्टेप सिग्नल (Step Signal) चाच एक विशेष प्रकार आहे, ज्यामध्ये A चे मूल्य 1 (Unity) असते. स्टेप सिग्नलचे मॅथेमॅटिकल रीप्रेजेंटेशन (Mathematical Representation):

r(t) = A * u(t)

जेथे, u(t) = 0; t < 0

= 1; t ≥ 0

लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace Transform) मध्ये:

$$L\{r(t)\} = R(s) = \frac{A}{s}$$

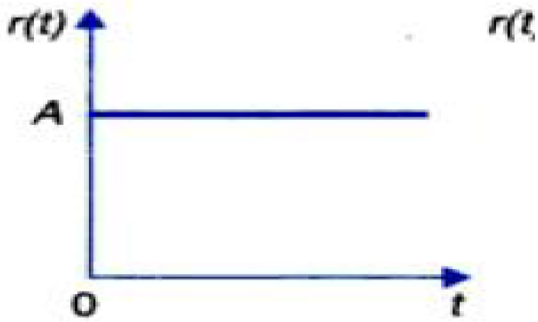


Fig.2.7

ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन ऑफ स्टेप सिग्नल

(Graphical Representation of Step Signal)

2.2.2 रॅम्प सिग्नल (Ramp Signal) (वेग फंक्शन - Velocity Function): रॅम्प सिग्नल (Ramp Signal) हा असा सिग्नल (Signal) आहे, जो 0 पासून सुरू होतो आणि वेळेसोबत रेषीय (linearly) वाढत जातो.

रॅम्प सिग्नल (Ramp Signal) हा प्रणालीस दिलेल्या स्थिर वेगाच्या इनपुटसारखा असतो. युनिट रॅम्प सिग्नल (Unit Ramp Signal) हा विशेष प्रकार आहे, ज्यामध्ये A चे मूल्य 1 (Unity) असते.

रॅम्प सिग्नलचे मॅथेमॅटिकल रीप्रेजेंटेशन (Mathematical Representation):

r(t) = 0 ; t < 0

= A * t ; t ≥ 0

लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace Transform) मध्ये:

$$L\{r(t)\} = R(s) = \frac{A}{s^2}$$

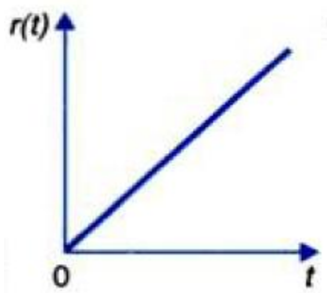


Fig.2.8

ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन ऑफ रॅम्प सिग्नल

(Graphical Representation of Ramp Signal)

2.2.3 पॅराबोलिक सिग्नल (Parabolic Signal) (त्वरण फंक्शन - Acceleration Function): पॅराबोलिक सिग्नल (Parabolic Signal) मध्ये तत्काळ मूल्य (Instantaneous Value) वेळेच्या वर्ग (Square) प्रमाणे बदलते आणि **t** = 0 वर प्रारंभिक मूल्य 0 असते. याचा ग्राफिकल (Graphical) प्रतिनिधित्व पॅराबोलासारखा दिसतो. पॅराबोलिक सिग्नल (Parabolic Signal) हा प्रणालीस दिलेल्या स्थिर त्वरणाच्या (Constant Acceleration) इनपुटसारखा असतो.

पॅराबोलिक सिग्नलचे मॅथेमॅटिकल रीप्रेजेंटेशन (Mathematical Representation):

$$r(t) = 0 \; ; \; t < 0$$
$$= (A * t^2) / 2 \; ; \; t \geq 0$$

लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace Transform) मध्ये:

$$L\{r(t)\} = R(s) = \frac{A}{s^3}$$

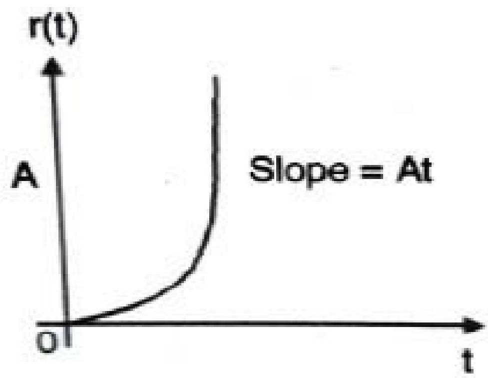


Fig.2.9
ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन ऑफ पॅराबोलिक सिग्नल
(Graphical Representation of Parabolic Signal)

2.2.4 इम्पल्स सिग्नल (Impulse Signal) (जर्क फंक्शन - Jerk Function): इम्पल्स इनपुट सिग्नल (Impulse Input Signal) हा अतिशय कमी वेळेसाठी (Short Duration) आणि खूप मोठ्या ऍम्प्लिट्यूडचा (Very High Amplitude) असतो. हा सिग्नल तत्काळ (Instantly) लागू केला जातो. t = 0 वगळता कोणत्याही क्षणी (Instant) हा सिग्नल 0 असतो. t = 0 वर त्याची किंमत (infinity) होते. या सिग्नलचा क्षेत्रफळ (Area) म्हणजे त्याचे ऍम्प्लिट्यूड (Amplitude) असते. याला डेल्टा फंक्शन (δ-Function) असे म्हणतात आणि δ(t) ने दर्शवले जाते.

इम्पल्स सिग्नलचे मॅथेमॅटिकल रीप्रेजेंटेशन (Mathematical Representation):

$$\delta(t) = \infty; t = 0$$
$$= 0; \; t \neq 0$$
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = A$$

In the form of लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform),

$$L\{\delta(t)\} = R(s) = 1$$

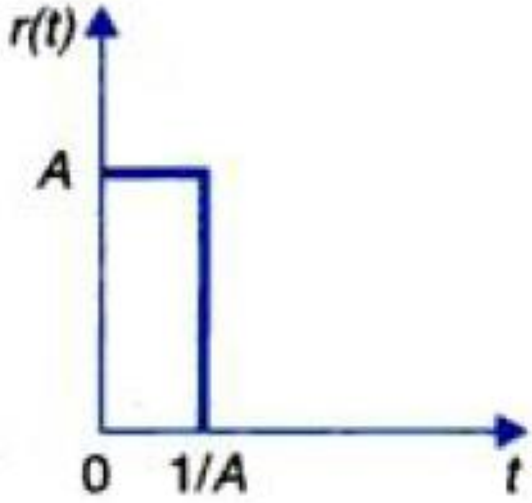


Fig.2.10
ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन ऑफ इम्पल्स सिग्नल
(Graphical Representation of Impulse Signal)

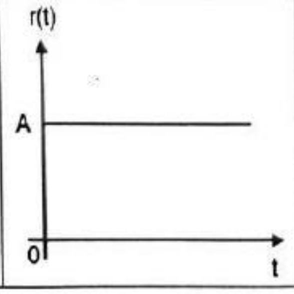
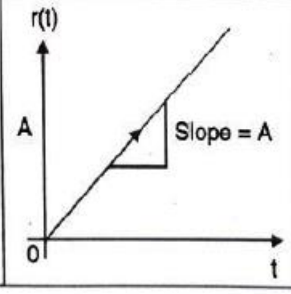
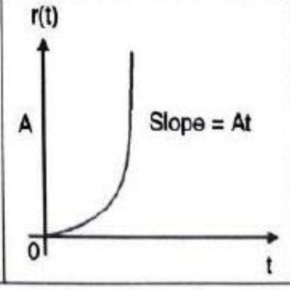
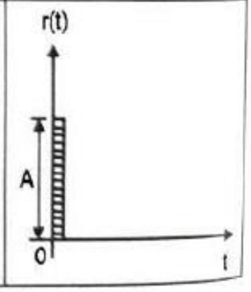
Table 2.1
स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्स (सिग्नलस)
Standard Test Input (Signals)

Name of the Signal	Time domain equation of signal, r(t)	Laplace Transform of the signal, R(s)
Step	A	$\frac{A}{s}$
Unit Step	1	$\frac{1}{s}$
Ramp	At	$\frac{A}{s^2}$
Unit Ramp	T	$\frac{1}{s^2}$
Parabolic	$\frac{At^2}{2}$	$\frac{A}{s^3}$
Unit Parabolic	$\frac{t^2}{2}$	$\frac{1}{s^3}$
Impulse	δ (t)	1

Table 2.2

स्टँडर्ड टेस्ट इनपुट्स (सिग्नलस)

Comparison of all types of Standard Test Signals

Parameter/ Input Signals	Step input	Ramp input	Parabolic	Impulse
r (t)	$A \cdot u(t)$	$A \cdot t$	$\left(\frac{A}{2}\right) \cdot t^2$	A
R (s)	$\frac{A}{s}$	$\frac{A}{s^2}$	$\frac{A}{s^3}$	1
Type of function	Position	Velocity	Acceleration	Short time pulse
Figure				

2.3 फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम (First Order System): युनिट स्टेप इनपुटसाठी विश्लेषण (Analysis for Unit Step Input). फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिममध्ये झिरो (Zero) नसल्यास त्याचे ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function) फिगर 2.3.1(a) मध्ये दाखवले आहे. जर इनपुट युनिट स्टेप असेल, जिथे $R(s) = 1/s$ असेल, तर स्टेप रिस्पॉन्सचा (Step Response) लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace Transform) C(s) असेल.

Where $C(s) = R(s)G(s) = \frac{a}{s(s+a)}$

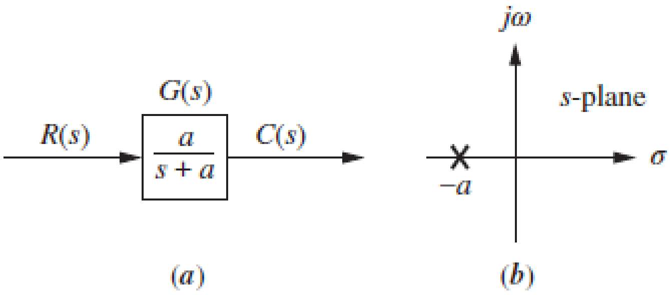


Fig.2.11

a. फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम b. पोल प्लॉट

a. First-order system; b. pole plot

फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम (First Order System) हा असा डायनामिक सिस्टिम आहे ज्याचे वर्तन फर्स्ट-ऑर्डर लीनियर डिफरेंशिअल इक्वेशनद्वारे नियंत्रित होते. हे सिस्टिम्स सहसा अशा भौतिक प्रणालींचे मॉडेलिंग करण्यासाठी वापरले जातात ज्या घसरत्या (exponential) प्रतिसाद (response) दर्शवतात, जसे की रेझिस्टर आणि कॅपेसिटर असलेले इलेक्ट्रिकल सर्किट्स किंवा डॅम्पर आणि मासेस असलेली मेकॅनिकल सिस्टिम्स.

2.3.1 फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिमचा वेळ प्रतिसाद (Time Response of the First Order System): खाली दिलेल्या ब्लॉक डायग्राममध्ये क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टिम (Closed Loop Control System) दर्शवली आहे. येथे, ओपन-लूप ट्रान्सफर फंक्शन (Open Loop Transfer Function) 1/sT युनिटी निगेटिव्ह फीडबॅक (Unity Negative Feedback) सोबत जोडलेले आहे.

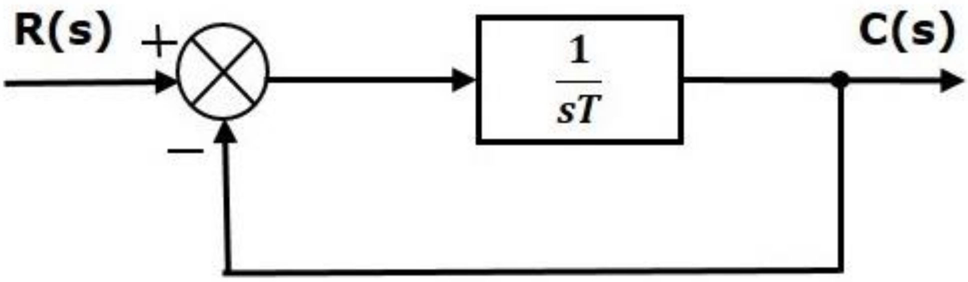


Fig.2.12
ब्लॉक डायग्राम ऑफ फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम
(Block diagram of a first order system)

आपण जाणतो की युनिटी निगेटिव्ह फीडबॅक असलेल्या क्लोज्ड-लूप कंट्रोल सिस्टिमचे ट्रान्सफर फंक्शन खालीलप्रमाणे आहे

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$$

Substitute, $G(s) = \frac{1}{sT}$ in the above equation.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{1}{sT}}{1 + \frac{1}{sT}} = \frac{1}{sT + 1}$$

's' चा घात (power) हरिणारी संज्ञा (denominator term) मध्ये 1 आहे. त्यामुळे वरील ट्रान्सफर फंक्शन फर्स्ट-ऑर्डर (first-order) आहे आणि हा सिस्टम फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम म्हणून ओळखला जातो.
आपण वरील समीकरण पुन्हा लिहू शकतो:

$$C(s) = \left(\frac{1}{sT + 1}\right) R(s)$$

जेथे, C(s) हे C(t) या आउटपुट सिग्नलचे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म आहे, R(s) हे r(t) या इनपुट सिग्नलचे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म आहे,आणि T हा टाइम कॉन्स्टंट आहे.
फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिमचा टाइम डोमेन (time domain) मधील रिस्पॉन्स (आउटपुट) मिळवण्यासाठी खालील स्टेप्स फॉलो करा:

1. इनपुट सिग्नल r(t) चा लाप्लास ट्रान्सफॉर्म घ्या.
2. समीकरण विचारात घ्या,

$$C(s) = \left(\frac{1}{sT + 1}\right) R(s)$$

3. वरील समीकरणात R(s) चे मूल्य टाका.
4. आवश्यक असल्यास, C(s) चे पार्शल फ्रॅक्शन (partial fraction) करा.
5. C(s) वर इन्व्हर्स लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (inverse Laplace transform) लागू करा.

यापूर्वी आपण इम्पल्स (impulse), स्टेप (step), रॅम्प (ramp), आणि पॅराबोलिक (parabolic) हे स्टँडर्ड टेस्ट सिग्नल्स पाहिले आहेत. आता आपण फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिमचा स्टेप इनपुट साठीचा रिस्पॉन्स शोधूया. इनपुट सिग्नलच्या नावानुसार रिस्पॉन्सचे नाव दिले जाते. उदाहरणार्थ, जर इनपुट स्टेप सिग्नल असेल, तर त्या सिस्टिमचा रिस्पॉन्स स्टेप रिस्पॉन्स म्हणून ओळखला जातो.

2.3.2 स्टेप रिस्पॉन्स ऑफ फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम (Step Response of First Order System):

Consider the unit step signal as an input to first order system.

So, r(t)=u(t)

लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform) दोन्ही बाजूस करा.

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

Consider the equation,

$$C(s) = \left(\frac{1}{sT+1}\right) R(s)$$

Substitute, $R(s) = \frac{1}{s}$ in the above equation

$$C(s) = \left(\frac{1}{sT+1}\right) \frac{1}{s} = \frac{1}{s(sT+1)}$$

Do partial fraction of C(s),

$$C(s) = \frac{1}{s(sT+1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{sT+1}$$

$$= \frac{1}{s(sT+1)} = \frac{A(sT+1)+Bs}{s(sT+1)}$$

On both the sides, the denominator term is the same. So, they will get cancelled by each other. Hence, equate the numerator terms.

$$1 = A(sT+1) + Bs$$

By equating the constant terms on both the sides, you will get A=1.

Substitute A=1 and equate the coefficient of the s term on the both sides.

$$0 = T + B \qquad \rightarrow \qquad B = -T$$

Substitute, A=1 and B= -T in partial fraction expansion of C(s).

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{sT+1} = \frac{1}{s} - \frac{T}{T(s+\frac{1}{T})}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+\frac{1}{T}}$$

Apply inverse Laplace transform on both the sides.

Thus, the response of first order system to a unit step input is

$$c(t) = \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}\right) u(t)$$

Where:

u(t)=K is the system's gain.

T is the time constant, determining how fast the system responds.

हे इक्वेशन (Equation) एका सिस्टीमच्या आउटपुटचा 0 ते K पर्यंत एक्स्पोनेंशियल (Exponential) वाढ दर्शवते, जिथे आउटपुट t वाढल्यावर K कडे हळूहळू जवळ जातो. वाढीचा वेग टाइम कॉन्स्टंट (Time Constant) T च्या मूल्यावर अवलंबून असतो.

युनिट स्टेप रिस्पॉन्स (Unit Step Response) c(t) मध्ये ट्रान्झिएंट (Transient) आणि स्टेडी स्टेट (Steady-State) दोन्ही टर्म्स असतात.

युनिट स्टेप रिस्पॉन्स (Unit Step Response) मधील ट्रान्झिएंट (Transient) टर्म आहे –

$$c_{tr}(t) = -e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} u(t)$$

युनिट स्टेप रिस्पॉन्स (Unit Step Response) मधील स्टेडी स्टेट (Steady State) टर्म आहे –

$$C_{ss}(t) = u(t)$$

2.3.3 ग्राफिकल रीप्रेजेंटेशन (Graphical Representation)

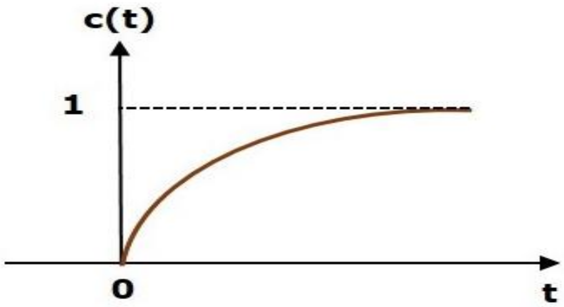


Fig.2.13

युनिट स्टेप रिस्पॉन्स ऑफ अ फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिम

(Unit step response of a first-order system)

युनिट स्टेप रिस्पॉन्स (Unit Step Response) च्या C(t) ची किंमत t = 0 आणि त्याच्या सर्व निगेटिव्ह (negative) मूल्यांसाठी 0 असते. ती हळूहळू वाढत जाते आणि अखेरीस स्टेडी स्टेटमध्ये (Steady State) 1 वर पोहोचते. त्यामुळे, स्टेडी स्टेट मूल्य इनपुटच्या (Input) परिमाणावर अवलंबून असते.

t = 0 वर, आउटपुट (Output) 0 असते.

t वाढत गेल्यावर, आउटपुट एक्स्पोनेंशियली (Exponentially) वाढते.

t → (infinity) असताना, आउटपुट K च्या जवळ जाते, पण पूर्णपणे K ला गाठत नाही.

2.3.4 रिस्पॉन्सच्या (Response) मुख्य वैशिष्ट्ये

1. **टाइम कॉन्स्टंट T (Time Constant T):**

   टाइम कॉन्स्टंट T सिस्टिमच्या (System) रिस्पॉन्सचा वेग ठरवतो. कमी T असल्यास रिस्पॉन्स जास्त वेगाने होतो, तर मोठे T असल्यास रिस्पॉन्स हळू होतो.

   T वेळेनंतर आउटपुट (Output) अंतिम मूल्याच्या सुमारे 63.2% पर्यंत पोहोचते.

2. **स्टेडी-स्टेट व्हॅल्यू (Steady-State Value):**

   सिस्टिमच्या आउटपुटचे स्टेडी-स्टेट मूल्य K असते. t → (infinity) झाल्यावर, C(t) चे मूल्य K च्या जवळ जाते.

3. **स्टेडी-स्टेटला पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ (Time to Reach Steady-State):**

   सिस्टिम प्रत्यक्षात कधीही स्टेडी-स्टेट मूल्य गाठत नाही, पण ते त्याच्या खूप जवळ जाते. सुमारे 5 टाइम कॉन्स्टंटनंतर (5T), आउटपुट अंतिम मूल्याच्या 1% च्या आत येते.

4. **राईज टाइम (Rise Time):**

राईज टाइम म्हणजे सिस्टिमच्या आउटपुटला 10% ते 90% पर्यंत वाढण्यासाठी लागणारा वेळ.
फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिममध्ये (First-Order System) हा अंदाजे 3T असतो.

निष्कर्ष (Conclusion):

फर्स्ट-ऑर्डर सिस्टिमचा (First-Order System) युनिट स्टेप इनपुटसाठी (Unit Step Input) रिस्पॉन्स हा स्टेडी-स्टेट मूल्याकडे जाणाऱ्या एक्स्पोनेंशियल वाढीने (Exponential Rise) दर्शविला जातो. टाइम कॉन्स्टंट T (Time Constant T) ठरवतो की सिस्टिम किती लवकर स्टेडी-स्टेटला पोहोचते, तर गेन K (Gain K) अंतिम आउटपुटचे मूल्य ठरवतो.

हा मॉडेल कंट्रोल सिस्टिम (Control System), इलेक्ट्रिकल सर्किट्स (Electrical Circuits), आणि मेकॅनिकल सिस्टिम्स (Mechanical Systems) यासारख्या विविध क्षेत्रांत वापरला जातो, जिथे असे वर्तन दिसून येते.

कंट्रोल सिस्टिममध्ये (Control System), टाइम रिस्पॉन्स स्पेसिफिकेशन्स (Time Response Specifications) अत्यंत महत्त्वाच्या असतात, कारण त्या सिस्टिमच्या दिलेल्या इनपुटवरील प्रतिसादाचे विश्लेषण करण्यास मदत करतात. विशेषतः युनिट स्टेप इनपुटसाठी, या स्पेसिफिकेशन्समुळे सिस्टिमचा वेग (Speed), स्थिरता (Stability), आणि अचूकता (Accuracy) समजून घेता येते. मुख्य टाइम रिस्पॉन्स स्पेसिफिकेशन्स पुढीलप्रमाणे आहेत:

2.3.5 मुख्य टाइम रिस्पॉन्स स्पेसिफिकेशन्स (Key Time Response Specifications)

1. **राईज टाइम (Rise Time, Tr):**

   व्याख्या (Definition): सिस्टिमच्या आउटपुटला अंतिम मूल्याच्या 10% ते 90% पर्यंत पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ.

   महत्त्व (Significance): सिस्टिम इनपुटमधील बदलांना किती जलद प्रतिसाद देते, हे दर्शवते.

   वापर (Application): ज्या ठिकाणी जलद प्रतिसाद आवश्यक असतो, अशा सिस्टिम्समध्ये महत्त्वाचे.

2. **पीक टाइम (Peak Time, Tp):**

   व्याख्या (Definition): सिस्टिमच्या रिस्पॉन्समध्ये पहिल्या पीक (ओव्हरशूट) वर पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ.

   महत्त्व (Significance): सिस्टिम किती वेगाने त्याच्या जास्तीत जास्त मूल्यावर पोहोचते, हे दर्शवते.

   वापर (Application): ज्या सिस्टिममध्ये ओव्हरशूट टाळणे आवश्यक असते, तिथे हे महत्त्वाचे ठरते.

3. **सेटलिंग टाइम (Settling Time, Ts):**

   व्याख्या (Definition): सिस्टिमच्या आउटपुटला त्याच्या अंतिम मूल्याच्या ठरावीक टक्केवारीत (साधारणतः 2% किंवा 5%) स्थिर होण्यासाठी लागणारा वेळ.

   महत्त्व (Significance): सिस्टिम एका डिस्टरबन्स (Disturbance) नंतर किती लवकर स्थिर होते, हे दर्शवते.

   वापर (Application): स्थिरता (Stability) महत्त्वाची असलेल्या सिस्टिम्समध्ये आवश्यक.

4. **डिले टाइम (Delay Time, Td):**

   व्याख्या (Definition): सिस्टिमच्या आउटपुटला त्याच्या अंतिम मूल्याच्या 50% पर्यंत प्रथमच पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ.

   महत्त्व (Significance): सिस्टिमचा सुरुवातीचा प्रतिसाद किती वेळ घेतो, हे दर्शवते.

   वापर (Application): जिथे प्रारंभिक प्रतिसाद वेळ महत्त्वाचा असतो, अशा सिस्टिम्समध्ये आवश्यक.

5. **पीक ओव्हरशूट (Peak Overshoot, Mp):**

व्याख्या (Definition): सिस्टिमच्या आउटपुटने अंतिम मूल्यापेक्षा किती जास्त वाढ घेतली आहे, हे अंतिम मूल्याच्या टक्केवारीत दर्शवले जाते.

महत्त्व (Significance): सिस्टिमच्या रिस्पॉन्समध्ये ओव्हरशूट किती प्रमाणात आहे, हे दर्शवते.

वापर (Application): जिथे ओव्हरशूट मर्यादित ठेवणे आवश्यक असते, तिथे हे खूप महत्त्वाचे असते.

ही स्पेसिफिकेशन्स समजून घेणे हे कंट्रोल सिस्टिम्स डिझाईन आणि ॲनालिसिससाठी अत्यंत महत्त्वाचे आहे, जेणेकरून सिस्टिम इच्छित कार्यप्रदर्शन निकष (Performance Criteria) पूर्ण करू शकेल. उदाहरणार्थ, अंडरडॅम्प्ड सिस्टिम्स (Underdamped Systems) मध्ये राईज टाइम म्हणजे रिस्पॉन्सला त्याच्या अंतिम मूल्याच्या 0% ते 100% पर्यंत पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ.

ही सर्व स्पेसिफिकेशन्स परस्पर संबंधित असतात. उदाहरणार्थ, डॅंपिंग (Damping) वाढवली तर ओव्हरशूट (Overshoot) कमी होतो, परंतु त्याच वेळी राईज टाइम वाढू शकतो. त्यामुळे, विशिष्ट परफॉर्मन्स रिक्वायरमेंट्स (Performance Requirements) पूर्ण करण्यासाठी योग्य संतुलन (Balance) साधणे आवश्यक असते.

2.4 सेकंड ऑर्डर सिस्टिम्स (Second Order Systems): सेकंड ऑर्डर सिस्टिम्स (Second Order Systems) म्हणजे अशा सिस्टिम्स ज्या ट्रान्सफर फंक्शनच्या डिनॉमिनेटर (Denominator) मध्ये 's' च्या उच्चतम घाताची (Highest Order) किंमत 2 असते. याचा अर्थ, या सिस्टिम्समध्ये दोन पोल्स (Two Poles) असतात.

सेकंड ऑर्डर सिस्टिम्सच्या विश्लेषणात वापरण्यात येणारे मुख्य टर्म्स:

डॅंपिंग (Damping): प्रत्येक सिस्टिममध्ये ऑस्सिलेटरी बिहेवियर (Oscillatory Behavior) कमी करण्याची प्रवृत्ती असते, त्याला डॅंपिंग म्हणतात. किंवा, एखाद्या ऑस्सिलेटरी सिस्टिममध्ये (Oscillatory System) ऑस्सिलेशन्स (Oscillations) कमी करणाऱ्या प्रभावाला डॅंपिंग म्हणतात.

सिस्टिम डॅंपिंग रेशो (ς - झीटा): हा एक डायमेंशनलेस क्वांटिटी (Dimensionless Quantity) आहे. ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्समध्ये (Transient Response) ऑस्सिलेशन्सचा (Oscillations) क्षय (Decay) कसा होतो, हे दर्शवतो.

सिस्टिम नॅचरल फ्रिक्वेन्सी (ω_n - ओमेगा n): ही अँग्युलर फ्रिक्वेन्सी (Angular Frequency) आहे. सिस्टिमवर डॅंपिंग फोर्स (Damping Force) नसताना ती ज्या फ्रिक्वेन्सीला नैसर्गिकरित्या ऑस्सिलेट (Oscillate) होते, तिला नॅचरल फ्रिक्वेन्सी म्हणतात.

सिस्टिम डॅम्प्ड फ्रिक्वेन्सी (ωd - ओमेगा d): ही अँग्युलर फ्रिक्वेन्सी आहे, जिच्या वेगाने सिस्टिम डॅंपिंग फोर्सच्या (Damping Force) उपस्थितीत ऑस्सिलेट होते. सिस्टिमचा रिस्पॉन्स ऑस्सिलेटरी (Oscillatory) असतो, पण त्याची ॲम्प्लिट्यूड (Amplitude) हळूहळू कमी होत जाते.

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}$$

2.4.1 सेकंड ऑर्डर सिस्टिमचा टाइम रिस्पॉन्स: खालील ब्लॉक डायग्राम (Block Diagram) मधील क्लोज्ड लूप कंट्रोल सिस्टिम (Closed Loop Control System) विचारात घ्या. येथे, ओपन लूप ट्रान्सफर फंक्शन (Open Loop Transfer Function) ...

$$\frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}$$

युनिटी निगेटिव फीडबॅक (Unity Negative Feedback) सोबत कनेक्ट केलेले आहे.

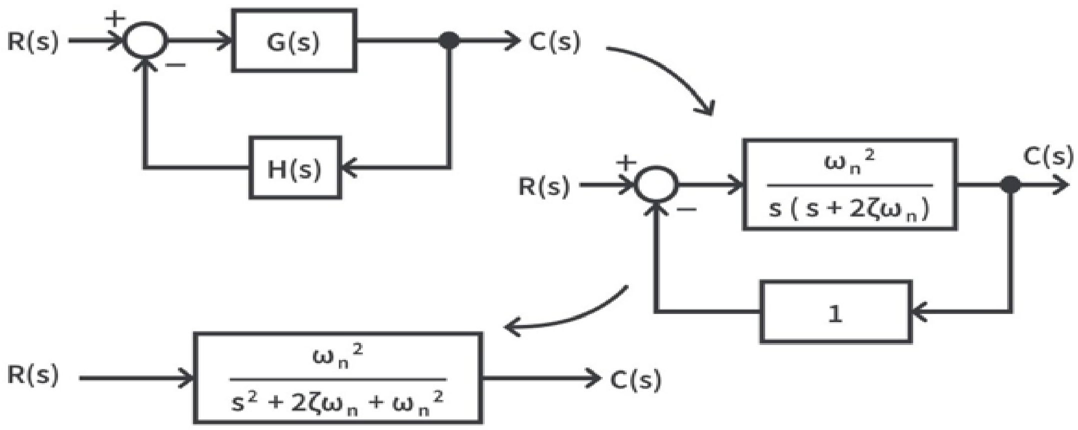


Fig.2.14

ब्लॉक डायग्राम आणि ट्रान्सफर फंक्शन ऑफ सेकंड ऑर्डर सिस्टिम

Block diagram & Transfer Function of a Second Order System

आपल्याला माहित आहे की युनिटी निगेटिव फीडबॅक (Unity Negative Feedback) असलेल्या क्लोज्ड लूप कंट्रोल सिस्टिम (Closed Loop Control System) ची ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function) खालीलप्रमाणे आहे:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

Substitute, $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}$ in the above equation.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}}{1+\left(\frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}\right)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$$

's' ची घातांक (power) **2** आहे डिनॉमिनेटर (denominator) मध्ये. त्यामुळे वरील ट्रान्सफर फंक्शन (Transfer Function) हे सेकंड ऑर्डर (Second Order) आहे आणि ह्या सिस्टिमला सेकंड ऑर्डर सिस्टिम (Second Order System) म्हणतात.

The कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन (characteristic equation) is - $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$

The रूट्स ऑफ कॅरॅक्टॅरिस्टिक इक्वेशन (roots of characteristic equation) are –

$$s = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{((2\zeta\omega_n)^2 - 4\omega_n^2)}}{2} = \frac{-2(\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{(\zeta^2-1)}}{2}$$

$$s = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{(\zeta^2-1)}$$

दोन रूट्स (roots) इमॅजिनरी (Imaginary) असतात जेव्हा $\delta = 0$.

दोन रूट्स रिअल आणि समान (Real and Equal) असतात जेव्हा $\delta = 1$.

दोन रूट्स रिअल पण वेगवेगळे (Real but Unequal) असतात जेव्हा $\delta > 1$.
दोन रूट्स कॉम्प्लेक्स कनजुगेट (Complex Conjugates) असतात जेव्हा $0 < \delta < 1$.
We can write C(s) equation as

$$C(s) = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}\right) R(s)$$

Where,
c(t) या आउटपुट सिग्नलचे, C(s) हे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform) आहे.
r(t) या इनपुट सिग्नलचे, R(s) हे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform) आहे.
ω_n is the नॅचरल फ्रिक्वेन्सी (natural frequency).
ζ is the डॅंपिंग रेशो damping ratio.

2.5 सेकंड ऑर्डर (Second Order) सिस्टिमची टाइम डोमेन स्पेसिफिकेशन्स (Time Domain Specifications):

अंडरडॅंप्ड (Underdamped) केससाठी सेकंड ऑर्डर (Second Order) सिस्टिमचा स्टेप प्रतिसाद (Step Response) खालील आकृतीत (Figure) दाखवलेला आहे.

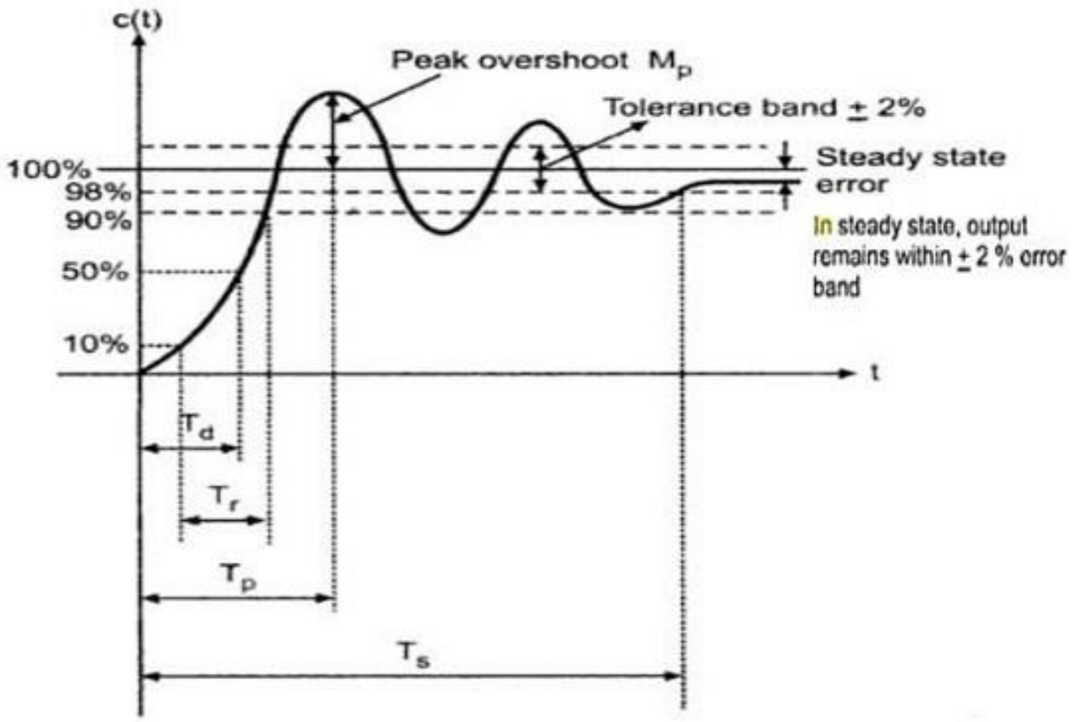


Fig.2.15
युनिट स्टेप रिस्पॉन्स ऑफ अ सेकंड-ऑर्डर सिस्टिम
(Unit step response of a second-order system)

जिथे,
डिले टाइम (Delay Time - Td) सेकंदात
राईज टाइम (Rise Time - Tr) सेकंदात
पीक टाइम (Peak Time - Tp) सेकंदात
सेटलिंग टाइम (Settling Time - Ts) सेकंदात

मॅक्सिमम पीक ओव्हरशूट (Maximum Peak Overshoot - Mp) टक्क्यांमध्ये
स्टेडी स्टेट एरर (Steady State Error - Ess)
सर्व टाइम डोमेन स्पेसिफिकेशन्स (Time Domain Specifications) या आकृतीत दर्शवले आहेत. सेटलिंग टाइम (Settling Time) पर्यंतचा रिस्पॉन्स (Response) ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Transient Response) म्हणून ओळखला जातो, तर सेटलिंग टाइम (Settling Time) नंतरचा प्रतिसाद स्टेडी स्टेट रिस्पॉन्स (Steady State Response) म्हणून ओळखला जातो.

2.5.1 डिले टाइम (Delay Time (T_d)): हा तो वेळ आहे ज्यामध्ये रिस्पॉन्स (Response) शून्य क्षणापासून अंतिम मूल्याच्या अर्ध्या (50%) मूल्यापर्यंत पोहोचतो. याला डिले टाइम (Delay Time - Td) म्हणतात.
डिले टाइम (Td) मिळवण्यासाठी खालील इक्वेशन वापरले जाते:

$$T_d = \frac{1 + 0.7\zeta}{\omega_n}$$

Where, नॅचरल फ्रिक्वेन्सी, $Natural\ Frequency, \omega_n = \omega_d\sqrt{(1-\zeta^2)}$

डॅंप्ड फ्रिक्वेन्सी, $Damped\ Frequency, \omega_d$

2.5.2 राइझ टाइम (Rise Time - Tr) म्हणजे प्रतिसाद (Response) अंतिम मूल्याच्या 0% पासून 100% पर्यंत पोहोचण्यासाठी लागणारा वेळ. हे प्रामुख्याने अंडर-डॅम्पड (Under-damped) सिस्टिम्स साठी लागू आहे. ओव्हर-डॅम्पड (Over-damped) सिस्टिम्स साठी, राइझ टाइम हा 10% ते 90% अंतिम मूल्याच्या दरम्यान घेतला जातो.
राइझ टाइम Tr ने दर्शवला जातो.

$$\text{At } t = t_1 = 0,\ c(t) = 0$$

$$T_r = \frac{\pi - \theta}{\omega_d}$$

Where, $\theta = \frac{\sqrt{(1-\zeta^2)}}{\zeta}$

वरील इक्वेशनवरून आपण असा निष्कर्ष काढू शकतो की राइझ टाइम (T_r) आणि डॅम्पड फ्रिक्वेन्सी (ω_d) हे एकमेकांच्या व्यस्त प्रमाणात (इनव्हर्सली प्रपोर्शनल – inversely proportional) असतात.
याचा अर्थ असा की, जर डॅम्पड फ्रिक्वेन्सी (ω_d) वाढली, तर राइझ टाइम (T_r) कमी होतो, आणि जर डॅम्पड फ्रिक्वेन्सी कमी झाली, तर राइझ टाइम वाढतो.

2.5.3 पीक टाईम (Peak Time) (T_p): हा तो वेळ आहे ज्यामध्ये प्रतिसाद (response) प्रथमच त्याच्या **पीक व्हॅल्यू (Peak Value)** पर्यंत पोहोचतो. याला **Tp** ने दर्शवले जाते.
t = Tp या क्षणी, प्रतिसादाची पहिली अवकलज (फर्स्ट डेरिव्हेटीव - first derivative) **0** असते, म्हणजेच त्या बिंदूवर प्रतिसादाचा वाढण्याचा दर थांबतो.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

वर दिलेल्या इक्वेशनवरून आपण हे निष्कर्ष काढू शकतो की पीक वेळ (Tp) आणि डँप्ड फ्रिक्वेन्सी (ω_d) यांचे परस्पर व्यस्त प्रमाण (इनव्हर्स्ली प्रपोर्शनल inversely proportional) आहे.
याचा अर्थ असा की, जर डँप्ड फ्रिक्वेन्सी (ω_d) वाढली, तर पीक वेळ (T_p) कमी होईल आणि जर डँप्ड फ्रिक्वेन्सी कमी झाली, तर पीक वेळ वाढेल.

2.5.4 पीक ओव्हरशूट Peak Overshoot (M_p): पीक ओव्हरशूट (Mp) हे पीक वेळ (Tp) वर प्रतिसादाचा अंतिम मूल्यापासून होणारा जास्तीत जास्त फरक दर्शवते. हा संक्रमण कालावधी (transient period) दरम्यान संदर्भ इनपुट आणि आउटपुट यामधील सर्वात मोठा त्रुटी (एरर - error) असतो. यालाच मॅक्सिमम ओव्हरशूट (maximum overshoot) असेही म्हणतात.
गणितीयदृष्ट्या, हे पुढीलप्रमाणे लिहिता येते – $Mp = c(Tp) - c(\infty)$
इथे,
c(Tp) = प्रतिसादाचा पीक वेळ (Tp) वरील मूल्य
c(∞) = प्रतिसादाचे अंतिम स्थिर स्थितीतील (स्टेडीस्टेट steady state) मूल्य
t = Tp वर प्रतिसाद (c(t)) चे मूल्य पुढीलप्रमाणे असते –

$$c(T_p) = 1 - \left(\frac{e^{-\zeta\omega_n T_p}}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\sin(\omega_d T_p + \theta)$$

$$M_p = e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}$$

2.5.5 Percentage of पीक ओव्हरशूट (peak overshoot) : % Mp can be calculated by using this formula.

$$\%M_p = \frac{M_p}{c(\infty)} \times 100\% = \left(e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}\right) \times 100\%$$

Mp आणि c(∞) चे मूल्य वरील सूत्रामध्ये बसवल्यावर, पीक ओव्हरशूट (Mp) चे टक्केवारीतील मूल्य (% Mp) मिळते.
वरील समीकरणावरून असे निष्पन्न होते की डॅम्पिंग रेशो (ζ) वाढल्यास पीक ओव्हरशूट (% Mp) कमी होते.

2.5.6 Settling time (T_s): ही ती वेळ आहे ज्या वेळेत रिस्पॉन्स प्रतिसाद (response) स्थिर स्थितीपर्यंत (steady state) पोहोचतो आणि अंतिम मूल्याच्या आसपास दिलेल्या टॉलरन्स बँडमध्ये (tolerance band) (2% किंवा 5%) राहतो.
सेटलिंग टाइम (Settling Time) ला Ts असे दर्शवले जाते.
The settling time for 5% tolerance band is –

$$T_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} = 3T$$

The settling time for 2% tolerance band is –

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = 4T$$

Where,

$$T = \frac{1}{\zeta\omega_n}$$

T is the time constant.

Table No.2.3

फॉरमूली ऑफ टाईम डोमेन स्पेसीफिकेशन्स, सबस्टीट्रशन ऑफ नेसेसरी व्हॅल्यूज आणि फायनल व्हॅल्यूज

(Formulae of time domain specifications, substitution of necessary values and the final values.)

Time domain specification	**Formula**	**Substitution of values in formula**	**Final value**
डिले टाइम Delay time	$T_d = \frac{1+07\zeta}{\omega_n}$	$T_d = \frac{1+07(0.5)}{2}$	$T_d = 0.675\ sec$
राइझ टाइम Rise time	$T_r = \frac{\pi-\theta}{\omega_d}$	$T_r = \frac{\pi-(\frac{\pi}{3})}{1.732}$	$T_r = 1.207\ sec$
पीक टाईम Peak time	$T_p = \frac{\pi}{\omega_d}$	$T_p = \frac{\pi}{1.732}$	$T_p = 1.813\ sec$
% पीक टाईम % Peak time	$\%M_p = (e^{-(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}})}) \times 100\%$	$\%M_p = (e^{-(\frac{0.5\pi}{\sqrt{1-0.5^2}})}) \times 100\%$	$\%M_p = 16.32\%$
सेटलिंग टाइम फॉर 2% टॉलरन्स बँड Setting time for 2% tolerance band	$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$	$T_s = \frac{4}{0.5 \times 2_n}$	$T_s = 4\ sec$

2.5.7 स्थिर स्थिती एरर (Steady State Error - ess): जेव्हा कंट्रोल सिस्टिमचा आउटपुट इच्छित प्रतिसादापासून स्थिर स्थितीत (steady state) काही प्रमाणात वेगळा राहतो, त्याला स्थिर स्थिती एरर (steady state error - ess) म्हणतात.

ही एरर फायनल व्हॅल्यू थिअरम (Final Value Theorem) चा उपयोग करून शोधता येते.

$$e_{ss} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{t\to 0} sE(s)$$

जेथे, E(s) हा एरर सिग्नल (error signal) e(t) चा लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace Transform) आहे. आता युनिटी फीडबॅक सिस्टिमसाठी (Unity Feedback System) स्थिर स्थिती एरर (steady state error - ess)

कसा शोधायचा ते पाहूया. युनिटी फीडबॅक सिस्टिमसाठी स्थिर स्थिती एरर (Steady State Error for Unity Feedback Systems)

Consider the following block diagram of closed loop control system, which is having unity negative feedback.

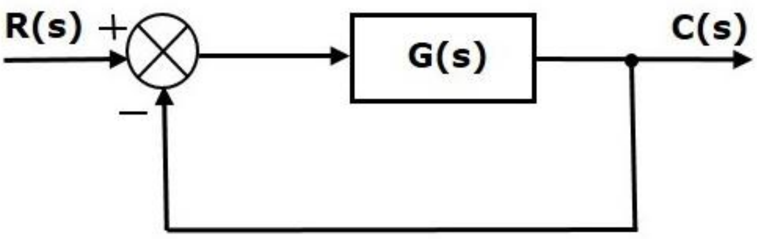


Fig.2.16

ब्लॉक डायग्राम ऑफ क्लोज्ड लूप कंट्रोल सिस्टिम

(Block diagram of closed loop control system)

Where,

c(t) या आउटपुट सिग्नलचे, C(s) हे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform) आहे.

r(t) या इनपुट सिग्नलचे, R(s) हे लाप्लास ट्रान्सफॉर्म (Laplace transform) आहे.

We know the transfer function of the unity negative feedback closed loop control system as

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

$$C(s) = \frac{R(s)G(s)}{1+G(s)}$$

The output of the summing point is – $E(s) = R(s) - C(s)$

Substitute C(s) value in the above equation.

$$E(s) = R(s) - \frac{R(s)G(s)}{1+G(s)}$$

$$E(s) = \frac{R(s) + R(s)G(s) - R(s)G(s)}{1+G(s)}$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1+G(s)}$$

Substitute E(s) value in the steady state error formula,

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)}$$

Table No.2.3

स्टेडी स्टेट एरर आणि एरर कॉनस्टंट फॉर स्टँडर्ड इनपुट्स सिग्नलस

Steady State Errors and the error constants for standard input signals

Input Signal	Steady State Error e_{ss}	Error Constant
Unit Step Signal	$\frac{1}{1+K_p}$	$K_p = \lim_{s\to 0} G(s) = \infty$
Unit Ramp Signal	$\frac{1}{K_v}$	$K_v = \lim_{s\to 0} sG(s) = \infty$
Unit Parabolic Signal	$\frac{1}{K_a}$	$K_a = \lim_{s\to 0} s^2G(s) = 1$

जेथे, Kp = पोझिशन एरर कॉन्स्टंट (Position Error Constant)
Kv = व्हेलॉसिटी एरर कॉन्स्टंट (Velocity Error Constant)
Ka = अक्सेलरेशन एरर कॉन्स्टंट (Acceleration Error Constant)
टीप: जर वरील कोणत्याही इनपुट सिग्नलचा अम्प्लिट्यूड (Amplitude) युनिटीपेक्षा वेगळा असेल, तर त्या इनपुटच्या स्थिर स्थिती एरर (steady state error - ess) ला त्या अम्प्लिट्यूडने गुणा करावे.
युनिट इम्पल्स सिग्नलसाठी स्थिर स्थिती एरर (steady state error) निश्चित करता येत नाही, कारण हा सिग्नल फक्त मूळ बिंदूवर (ओरीजीन - origin) अस्तित्वात असतो. त्यामुळे, इम्पल्स रिस्पॉन्स (impulse response) आणि युनिट इम्पल्स इनपुट यांची तुलना करता येत नाही जेव्हा t (टाइम) (infinity) होतो.

Example: Let us find the steady state error for an input signal $r(t) = \left(5 + 2t + \frac{t^2}{2}\right)u(t)$ of unity negative feedback control system with $G(s) = \frac{5(s+4)}{s^2(s+1)(s+20)}$

The given input signal is a combination of three signals step, ramp and parabolic. The following table shows the error constants and steady state error values for these three signals.

Table No.2.3

Error constant and Steady State Errors for standard input signals

Input Signal	Error Constant	Steady State Error
$r_1(t) = 5u(t)$	$K_p = \lim_{s\to 0} G(s) = \infty$	$e_{ss1} = \frac{5}{1+K_p} = 0$
$r_2(t) = 2tu(t)$	$K_v = \lim_{s\to 0} sG(s) = \infty$	$e_{ss2} = \frac{2}{K_v} = 0$
$r_3(t) = \frac{t^2}{2}u(t)$	$K_a = \lim_{s\to 0} s^2G(s) = 1$	$e_{ss3} = \frac{1}{K_a} = 1$

ओव्हर ऑल स्टेडी स्टेटएरर वरील तिन्ही स्टेडी स्टेट एरर्स ला ॲड करून मिळेल.

$$e_{ss} = e_{ss1} + e_{ss2} + e_{ss3}$$

$$e_{ss} = 0 + 0 + 1$$

Therefore, we got the steady state error e_{ss} as **1** for this example.

Question Bank

1. Define first order of the system and write one example. (R)
2. Draw step response of first order system. (U)
3. Sketch the step-signal and ramp signal. (U)
4. Find the transfer function of closed loop control system with negative feedback. (A)
5. Sketch output time response relationship of second order system for step input. Define rise time and peak time. (A)
6. For given transfer function:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K(s+4)}{s(s+2)(s^2+6s+9)}$$

Find: i) Poles ii) Zeros iii) Characteristic Equation and iv) Order of the system. (A)

7. Define the following terms: i) Delay time and Rise time. (R)
8. Define following terms related to 2nd order system:
   i) Damping ii) Damping ratio iii) Undamped natural frequency and iv) Damped frequency.(R)
9. Describe unit step signal and unit ramp signal as standard test signals with their mathematical expressions and graphical representations. (U)
10. For unity feedback system the transfer function is: $\frac{25s}{s^2+6S+25}$
    Find: i) Rise time ii) Peak time and iii) Settling time. (A)
11. A system has poles as S = –3, S = –2 and zero at s = –1. Represent the system in S plane. (A)
12. For a given transfer function:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{10(s+8)}{s(s+4)(s^2+5s+6)}$$

Find i) poles ii) zeros iii) plot them on S-plane and iv) Characteristics equation. (A)

13. State the necessity of standard test signal. (U)
14. Write the Laplace transform for the following input signal.
    i) Step ii) Ramp iii) Parabolic and iv) Impulse (U)
15. Define Pole and Zero. (R)
16. A unity feedback system with open loop transfer function: $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{10(s+2)(s+3)}{s(s+1)(s+4)(s+7)}$
    Find: i) Type of system and Kp, Kv, Ka
    ii) Steady state error for i/p = 2+t+t2 (A)
17. State the Laplace Transform of step and Ramp signals. (U)

18. Find out the poles and zeros of the following transfer function

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{16}{s^2 + 4s + 16}$$ (A)

19. Find out settling time, peak time and pack overshoot for the transfer function

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{(s^2 + 4)}{s(s^2 + 9s + 18)}$$ (A)

20. A second order system had

$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{s^2+6s+25}$ for unity step input, determine

i) Natural and damped frequency
ii) Rise time
iii) Peak time
iv) Peak overshoot
v) Settling time

Unit 3 Stability Analysis
स्टॅबिलिटी अनॅलिसिस

विषय निष्पत्ती (CO): दिलेल्या कंट्रोल सिस्टीम ची स्टॅबिलिटी तपासणे.

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

TLO 3.1 स्टॅबिलिटी वर आधारित सिस्टीमचे प्रकार लिस्ट करा.

TLO 3.2 एस प्लेन मधील पोलच्या लोकेशन नुसार त्याची स्टॅबिलिटी निश्चित करा.

TLO 3.3 राउथच्या निकषाचा वापर करून स्टॅबिलिटी निश्चित करा.

TLO 3.4 स्टॅबिल सिस्टीम साठी 'k' ची रेंज निश्चित करा.

3.1 स्टॅबिलिटी (Stability): स्टॅबिलिटी ही कंट्रोल सिस्टीम ची एक महत्त्वाची वैशिष्ट्ये आहे**.** जिथे ती सूचित करते की जेव्हा त्याचे आउटपुट कंट्रोलमध्ये असते तेव्हा सिस्टीम स्टेबल असते**.** कंट्रोल सिस्टीम बाउंडेड इनपुटसाठी बाउंडेड आउटपुट तयार करते**.**

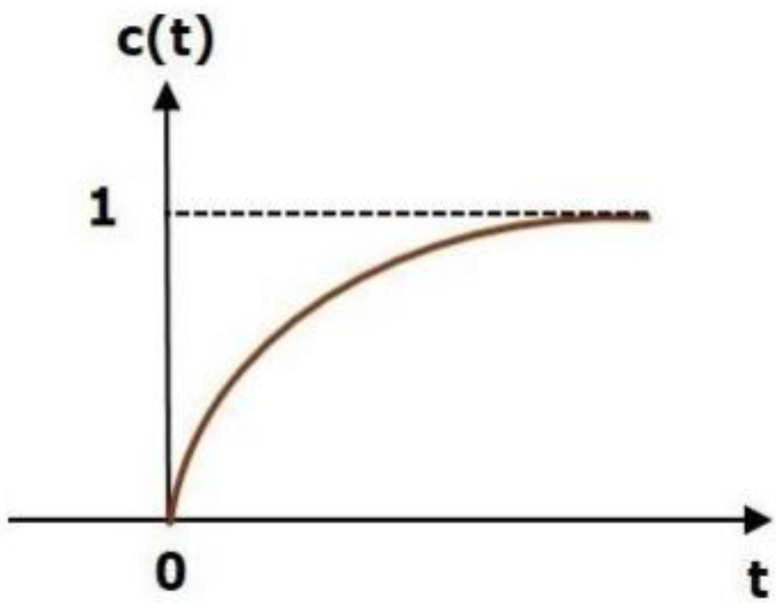


Fig.3.1
Response of stable system
(**Courtesy**: https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_stability.htm)

दिलेल्या आकृतीमध्ये फर्स्ट ओर्डर युनिट स्टेप रिस्पॉन्सच्या ज्या आउटपुट व्हॅल्यू ज आहेत त्या 1 आणि 0 वर बाउंडेड आहेत**.** त्यामुळे असे सूचित होते की बाउंडेड इनपुटसाठी बाउंडेड आउटपुट तयार होते**.**

स्टॅबिलिटी वर आधारित सिस्टीमचे प्रकार:

1) कंप्लीटली स्टेबल सिस्टीम
2) कंडिशनल स्टेबल सिस्टीम
3) मार्जिनली स्टेबल सिस्टीम
4) अन स्टेबल सिस्टीम

1) कंप्लीटली स्टेबल सिस्टीम/पूर्णपणे स्थिर प्रणाली (Absolutely/Completely Stable System):

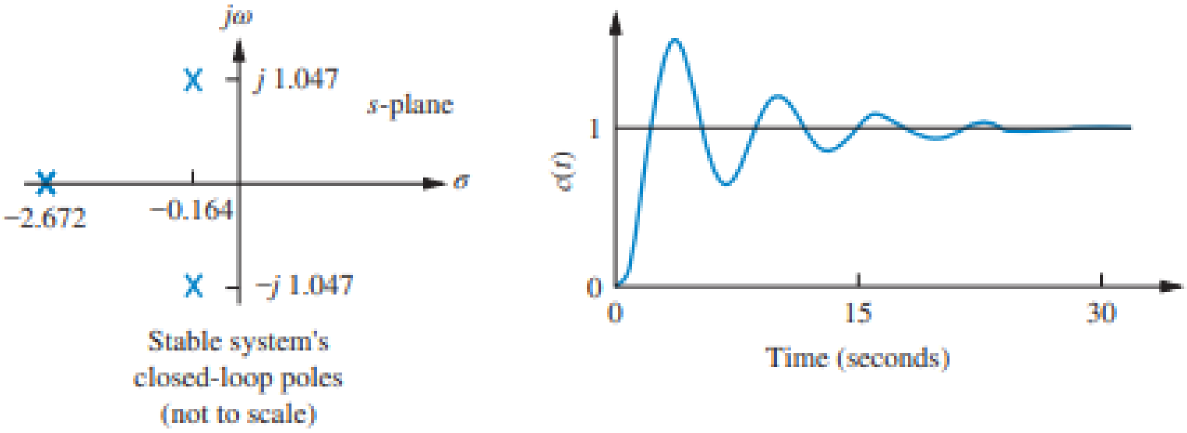


Fig.3.2

Location of roots for Absolutely Stable System

जर सिस्टीम, सर्व रेंजसाठी किंवा सिस्टीम घटकाच्या कोणत्याही व्हॅल्यू ज साठी स्थिर असेल, तर ती कंप्लीटली स्टेबल सिस्टीम म्हणून ओळखली जाते. ओपन लूप ट्रान्सफर फंक्शनचे सर्व पोल 's' प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागात असल्यास ओपन लूप कंट्रोल सिस्टीम कंप्लीटली स्टेबल असते. त्याचप्रमाणे, क्लोज्ड लूप ट्रान्सफर फंक्शनचे सर्व पोल 's' प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागात असल्यास क्लोज्ड लूप कंट्रोल सिस्टीम कंप्लीटली स्टेबल असते.

2) **कंडिशनल स्टेबल सिस्टीम (Conditionally Stable System):**

कंडिशनल स्टेबल सिस्टीम ही एक सिस्टीम आहे ज्यामध्ये सिस्टीमची स्टॅबिलिटी सिस्टीमच्या पॅरामीटर्सच्या स्थितीवर अवलंबून असते. जरी इनपुट बाउंडेड असला तरीसुद्धा या प्रकारात आऊटपुट काही विशिष्ट कंडीशन साठीच बाउंडेड आहे, आहे. जर त्याच बाउंडेड इनपुटसाठी कंडिशन बदलली तर आउटपुट अनबाउंड होईल.

3) **मार्जिनली स्टेबल सिस्टीम (Marginally/Critically Stable System):**

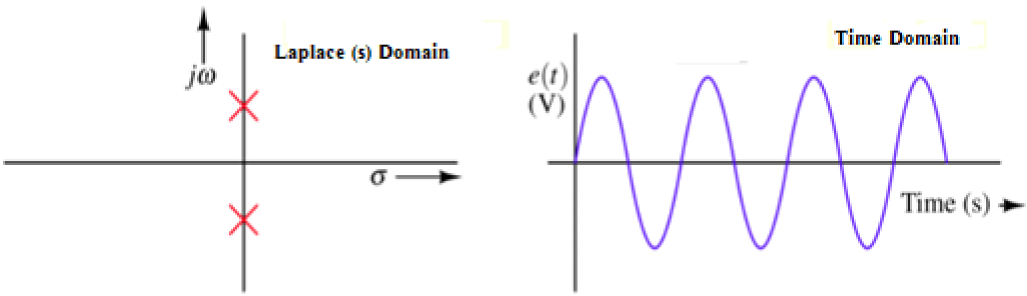


Fig. 3.3

Location of roots for Marginally Stable System

(**Courtesy**: https://analogcircuitdesign.com/stability-of-control-systems/)

जर नॅचरल रिस्पॉन्स हा डिके किंवा राईज होत नसेल परंतु एक स्टेट नंतर ती स्टेबल होत असेल तर लिनिअर टाइम-इनव्हेरिएंट सिस्टीम मर्जीनली स्टेबल असते. आणि हि सिस्टीम t→∞ होत असताना

अस्थिर किंवा अन स्टेबल होते. मार्जिनली स्टेबल सिस्टीम ही अशी सिस्टीम आहे जी बाउंडेड इनपुट दिल्यावर एक बाउंडेड आउटपुट तयार करते, परंतु आउटपुट शून्यावर परत येत नाही. तसेच इनपुटमधील कोणत्याही प्रकारच्या डिस्टर्बन्समुळे(व्यत्ययामुळे) सिस्टीम चे आउटपुट अनस्टेबल (अस्थिर) होते. मार्जिनली स्टेबल सिस्टीम मध्ये क्लोज-लूप ट्रान्सफर फंक्शन्सचे पोल हे इमॅजीनरी ऍक्सिस आणि **'s'** प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागात असतात.

4) अनस्टेबल सिस्टीम (Unstable System):

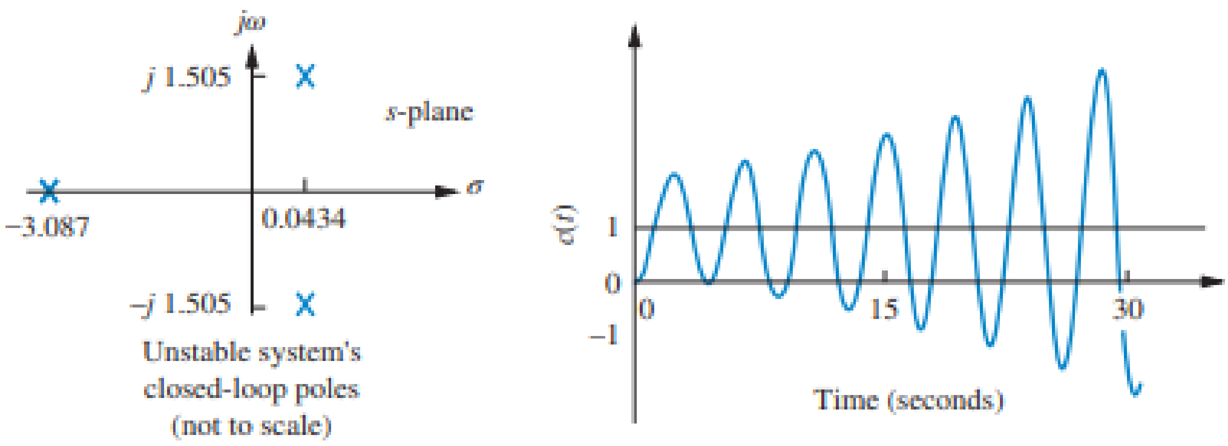
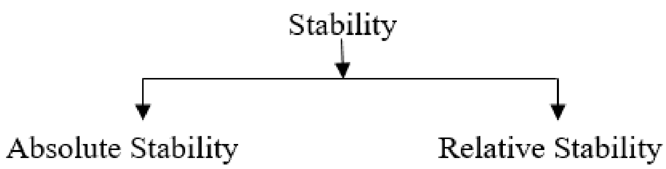


Fig. 3.4

Location of roots for unstable system

जस जसा t→∞ होत जातो तसतसा नॅचरल रिस्पॉन्स बाउंडशिवाय वाढतो अशी सिस्टीम हि अनस्टेबल सिस्टीमअसते. अनस्टेबल सिस्टीममध्ये क्लोज-लूप ट्रान्सफर फंक्शन्सचे पोल हे 's' प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात किमान एक पोल आणि/किंवा 1 पेक्षा जास्त पोल इमॅजीनरी ऍक्सिस वर असतात.

3.2 स्टॅबिलिटीचे प्रकार (Types of Stability):



1. अब्सोलुयुट स्टॅबिलिटी (Absolute Stability):

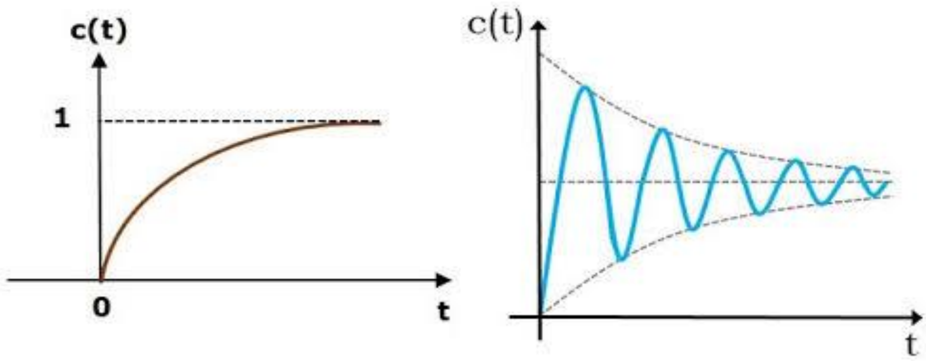


Fig. 3.5

कम्प्लीट स्टेबल सिस्टीमचा स्टेप रिस्पॉन्स (**Step Response of Absolutely Stable System**)

(Courtesy:https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_stability & https://electronicscoach.com/stability-of-control-system.html)

ऍबसोल्यूट स्टॅबिलिटीचा अर्थ असा होतो कि कंट्रोल सिस्टीम हि कम्प्लीट स्टेबल, अनस्टेबल किंवा कंडिशनल स्टेबल असते. जर या सर्व पॅरामीटरसाठी सिस्टीम रिस्पॉन्सस्टेबल असेल तर लिनिअर टाइम-इनव्हेरिएंट सिस्टीम हि कम्प्लीट स्टेबल असते. जर क्लोज लूप सिस्टीमचे पोल हे कॉम्प्लेक्स कॉन्जुगेट(Complex Conjugate) असतील तर सिस्टीम हि कम्प्लीट स्टेबल असेल. कम्प्लीट स्टेबल सिस्टीमचा स्टेप रिस्पॉन्स बघता तो डॅम्पड ऑसिलेशन तयार करतो.

2. **रिलेटिव्ह स्टॅबिलिटी (Relative Stability):** रिलेटिव्ह स्टॅबिलिटी हि प्रत्येक रूटच्या रिलेटीव्ह सेटलिंग टाईम नुसार मोजली जाते. कॉम्प्लेक्स कॉन्जुगेट (Complex Conjugate) पोल च्या पेयरचा सेटलिंग टाईम हा रूटच्या रिअल पार्टला इनव्हरसली प्रपोर्शनल असतो. जसजसे रूट इमॅजीनरी ऍक्सिस पासून दूर जाते तसतसे सिस्टीमची रेलेटीव्ह स्टॅबिलिटी सुधारते.

3.2.1 कंट्रोल सिस्टीम चा स्टॅबिलिटी अनॅलिसिस (Stability Analysis of Control System):

1. स्टेबल सिस्टीम साठी:

क्लोज लूप ट्रान्स्फर फंक्शन गृहीत धरा,

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{K}{2a(s+p_1)(s+p_2)}$$

आता युनिट स्टेप इनपुट द्या म्हणजेच इनपुट r (t) =1

त्यामुळे,

$$R(s) = \frac{K}{2a(s+p_1)(s+p_2)}$$

त्यामुळे,

$$C(s) = \frac{K}{s\ (s+p_1)(s+p_2)}$$

पार्शिअल फ्रॅक्शन काढूया,

$$R(s) = \frac{\frac{A}{s} + B}{(s+p_1) + \frac{C}{(s+p_2)}}$$

इन्व्हर्स लॅपलास ट्रान्सफॉर्म,

$$C(t) = A - B * e^{-p_1 t} - C * e^{-p_2 t}$$

$$C(t) = Css + Ct(t)$$

$$C(t) = Steady\ State + transient$$

वरील ट्रान्सफर फंक्शनवरून हे स्पष्ट होते की P1 आणि P2 हे दोन्ही ध्रुव s-प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागात आहेत. आणि आउटपुट रिस्पॉन्समध्ये e^{-p1t} आणि e^{-p2t} या दोन निगेटिव्ह घातांकीय / एक्सपोनेन्शियल टर्म आहेत. येथे जस जसा t → ∞ होत जातो तस तसे वरील घातांकीय/ एक्सपोनेन्शियल टर्मची व्हॅल्यू झिरो होत जाते म्हणजेच आउटपुट झिरो होतो.

त्यामुळे,

C_t (t) for t→∞

i.e. steady state output

Transient output=0

ज्या सिस्टीम मध्ये जसजसा t → ∞ होत जातो ट्रान्झीयंट आउटपुट झिरो होतो अशा सिस्टीमला अब्सोल्यूटली स्टेबल सिस्टीम म्हणतात. कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशनचे सर्व मूळ s-प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागावर असल्यास, सिस्टीम स्टेबल सिस्टीम आहे. हे ॲनालिसिस कंट्रोल सिस्टीमची स्टॅबिलिटी कोणत्या घटकांवर अवलंबून असते हे दर्शवते.

2. अनस्टेबल सिस्टीम साठी (for unstable System):

ज्या सिस्टिमचे क्लोज लूप रूट हे s-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात आहे अशी क्लोज लूप सिस्टीम गृहीत धरूया.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{K}{(s-p_1)(s+p_2)}$$

आता युनिट स्टेप इनपुट द्या म्हणजेच इनपुट, r (t) =1

त्यामुळे,

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

त्यामुळे,

$$C(s) = \frac{K * R(s)}{s\ (s-p_1)(s+p_2)}$$

पार्शिअल फ्रॅक्शन काढूया,

$$C(s) = \frac{-A}{s} + \frac{B}{(s-p_1)} + \frac{C}{(s+p_2)}$$

इन्व्हर्स लॅपलास ट्रान्सफॉर्म,

$$C(t) = -A + B * e^{+p1t} - C * e^{-p2t}$$

एक ध्रुव s-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात स्थित असल्याने आणि ट्रान्झीयंट आउटपुटमध्ये एक पॉझिटिव्ह एक्सपोनेन्शियल टर्म आहे.

तर Css=-A

हे सूचित करते की जस जशी t ची व्हॅल्यू 0 ते ∞ पर्यंत वाढत जाते , तस तशी c(t) ची व्हॅल्यू देखील मोठ्या प्रमाणात ∞ कडे वाढत जाते, म्हणजेच ट्रान्झीयंट आउटपुटमधील पॉझिटिव्ह एक्सपोनेन्शियल टर्ममुळे, जसजसा t→∞ होत जातो , तसेच ट्रांझियंट रिस्पॉन्सची अँप्लिटूड(Amplitude) लेवल देखील वाढत जाते. अशा सिस्टीम ला अनस्टेबल सिस्टीम म्हणतात . कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशनचे रूट s-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागावर असल्यास ती सिस्टीम अनस्टेबल आहे.

3.3 राउथचा स्टॅबिलिटी क्रायटेरिया (Routh's Stability Criterion):

राउथचा स्टॅबिलिटी क्रायटेरिया हि पद्धत क्लोज लूप सिस्टिमचे पोल कॅल्क्युलेट न करता स्टॅबिलिटीचा प्रकार दर्शविते. या पद्धतीचा वापर करून, s-प्लेनच्या डाव्या किंवा उजव्या अर्ध्या भागात आणि jω-ॲक्सिसवर क्लोज लूप सिस्टिमचे किती पोल आहेत हे आपण सांगू शकतो. आपण s-प्लेनच्या प्रत्येक भागात किती पोल आहेत हे शोधू शकतो, परंतु त्यांचे कॉर्डिनेट्स शोधता येणार नाहीत. या पद्धतीला राउथचा स्टॅबिलिटी क्रायटेरिया म्हणतात.पद्धतीसाठी दोन स्टेपची आवश्यकता आहे: (1) राउथ टेबल नावाचा डेटा टेबल तयार करा आणि (2) s-प्लेनच्या डाव्या किंवा उजव्या अर्ध्या भागात आणि jω-ऍक्सिसवर क्लोज लूप सिस्टिमचे किती पोल आहेत यासाठी राउथ टेबलचा वापर करा .लिनिअर टाइम-इनव्हेरिएंट सिस्टिमची स्टॅबिलिटी निर्धारित करण्यासाठी राउथ ॲरेच्या पहिल्या कॉलममधील चिन्हे आणि व्हॅल्यू चे परीक्षण करण्याची पद्धत वापरली जाते यालाच राउथचा स्टॅबिलिटी क्रायटेरिया म्हणतात. राउथ

अॅरेच्या पहिल्या कॉलममधील सर्व घटक पॉझिटिव्ह असल्यास, सिस्टीम स्टेबल आहे. s-प्लेनच्या कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशनच्या रूटच्या लोकेशनवरून स्टॅबिलिटी निश्चित केली जाऊ शकते. उच्च क्रमाने कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशन सोडवणे खूप महत्वाचे आणि वेळ लागणारेआहे. उच्च क्रम सिस्टीम कधीकधी अनस्टेबल असू शकते जरी तिचे सर्व कोइफिशेंट पॉझिटिव्ह असतात. रुथचा क्रायटेरिया कॅरेक्टरिस्टिक इक्वेशनमध्ये रूटचे लोकेशन शोधण्यात मदत करतो.

3.3.1 राउथ अॅरे (Routh's Array):राउथ अॅरे ही एक सारणीबद्ध (टॅब्युलर) अॅरे आहे जी कॅरेक्टरिस्टीक पॉलीनोमियलच्या कोइफिशेंट पासून पद्धतशीरपणे तयार केली जाते . हे s-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात असलेल्या पोल ची संख्या योग्य पद्धतीने निर्धारित करण्यात मदत करते. अॅरेच्या पहिल्या कॉलममधील चिन्हे आणि व्हॅल्यू चे परीक्षण केले जाते. याच प्रमाणे चौथ्या ओर्डरच्या पॉलीनोमियलच्या उदाहरणासह पुढे चालू ठेवा.सामान्य n^{th} ऑर्डर कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन खालीलप्रमाणेआहे

$$F(s) = a_0s^n+a_1s^{n-1}+a_2s^{n-2}+......+a_{n-1}\, s+ a_n=0.$$

लक्षात घ्या की, n^{th} ओर्डरच्या कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन मध्ये कोणतीही टर्म मिसिंग नसावी. याचा अर्थ असा की n^{th} ओर्डरच्या कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन मध्ये झिरो व्हॅल्यू चा कोणताही कोइफिशेंट नसावा.
राउथ अॅरेमध्ये खालील स्टेप्सचा समावेश आहे:
1) घातांकाच्या उतरत्या क्रमाने कॅरेक्टरिस्टीक पॉलीनोमियलच्या कोइफिशेंट ची मांडणी करावी.
2) कोइफिशेंट वापरून अॅरेच्या पहिल्या दोन रो तयार करा.
3) फोर्मुला वापरून त्यानंतरच्या रो ची कॅल्क्युलेशन करा

S^n	a_0	a_2	a_4	a_6……..
S^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7……..
S^{n-2}	b_1	b_2	b_3	b_4……..
S^{n-3}	c_1	c_2	c_3	c_4……..
⋮	⋮	⋮		
S^1	y_1	y_2		
S^0	a_n			

कोइफिशेंट b_1, b_2, b_3… आणि असेच खालीलप्रमाणे मूल्यमापन केले जाते

$$b_1 = \frac{(a_1a_2)-(a_0a_3)}{a_1}$$

$$b_2 = \frac{(a_1a_4)-(a_0a_5)}{a_1}$$

$$b_3 = \frac{(a_1a_6)-(a_0a_7)}{a_1}$$

शून्य येईपर्यंत ही प्रक्रिया अशीच चालू ठेवली जाते. त्याचप्रमाणे,
c_1, c_2, c_3… कोइफिशेंट खालीलप्रमाणे मोजले जातात

$$c_1 = \frac{(b_1a_3) - (b_2a_1)}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{(b_1a_5) - (b_3a_1)}{b_1}$$

या प्रक्रियेत, मिसिंग टर्म (missing terms) शून्य मानल्या जातात आणि कॅल्क्युलेशन सोपे करण्यासाठी कोणत्याही रो च्या घटकांना पॉझिटिव्ह नंबरने विभाजित केले जाऊ शकते. क्लोज लूप सिस्टीम स्टेबल होण्यासाठी, पहिल्या कॉलममधील सर्व कोइफिशेंट पॉझिटिव्ह असणे आवश्यक आहे आणि पहिल्या कॉलममध्ये कोणतेही कोइफिशेंट मिसिंग नसावेत. जर राउथच्या ॲरेच्या पहिल्या कॉलममध्ये कोणतेही चिन्ह बदलले असेल तर सिस्टीम अनस्टेबल आहे. चिन्हातील बदलांची संख्या s-प्लेनच्या उजव्या बाजूला असलेल्या रूट संख्येइतकी आहे

3.3.2 राउथच्या क्रायटेरियामधील स्पेशल केसेस (special cases): कोणत्याही कंट्रोल सिस्टीमवर राउथचे क्रायटेरिया लागू करताना स्टेप्समध्ये काही अडचणी येण्याची शक्यता असते.

केस-I (Case-I): जर राउथच्या ॲरेमधील कोणत्याही रो चा पहिला घटक शून्य असेल, तर उर्वरित रो मध्ये कमीत कमी एक नॉन-झिरो टर्म असेल तर या पुढील रो चा घटक इन्फिनिटी (Infinity) होतो आणि राउथचा क्रायटेरिया अयशस्वी होते.साठी उदा. कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन

$$F(s) = s^5+s^4+2s^3+2s^2+3s+5=0$$

या इक्वेशनसाठी राउथ ॲरे खालीलप्रमाणे असेल

s^5	1	2	3
s^4	1	2	5
s^3	$\frac{(1\times2)-(1\times2)}{1}=0$	$\frac{(1\times3)-(1\times5)}{1}=-2$	0
s^2	∞		

3री रो चा घटक शून्य असल्याने पुढील रो चा घटक ∞ (इन्फिनिटी) होतो आणि राउथच्या ॲरेअयशस्वी होतो. या समस्येचे निराकरण करण्यासाठी किंवा राउथच्या ॲरेमध्ये आलेल्या अडचणींवर मात करण्यासाठी दोन पद्धती आहेत

मेथड-I |(Method-I): एका रो मधील पहिला घटक म्हणून शून्यासाठी लहान पॉझिटिव्ह नंबर 'ε' बदला आणि पुढे जा. Routh's Array पूर्ण करा आणि पहिल्या कॉलममधील कोणत्याही चिन्हातील बदलाचे निरीक्षण करा. चिन्हातील बदल तपासण्यासाठी पहिल्या कॉलममधील घटकांना लिमिट $\varepsilon\rightarrow0$ लावा. आणि आपण स्टॅबिलिटी तपासू शकतो. त्यामुळे,

s^5	1	2	3
s^4	1	2	5
s^3	ε (in place of zero)	-2	0
s^2	$\frac{2\varepsilon+2}{\varepsilon}$	5	
s^1	$\frac{-4\varepsilon-4-5\varepsilon^2}{2\varepsilon+2}$	0	
s^0	5		

येथे चिन्ह बदल तपासण्यासाठी ε व्हॅल्यू असलेल्या पहिल्या कॉलममधील घटकांना लिमिट लावावे. म्हणजे

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{2\varepsilon + 2}{\varepsilon} = +\infty$$

आपण फक्त चिन्हावर लक्ष केंद्रित करत असल्यामुळे येथे आपल्याला पहिल्या कॉलममध्ये +∞ चिन्ह मिळते म्हणजेच चिन्ह पॉझिटिव्ह आहे.

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{-4\varepsilon - 4 - 5\varepsilon^2}{2\varepsilon + 2} = \frac{0 - 4 - 0}{0 + 2} = -2$$

पाचव्या रो चा पहिला घटक $\frac{-4\varepsilon-4-5\varepsilon^2}{2\varepsilon+2}$ आहे ज्याची लिमिट व्हॅल्यू 2 आहे कारण $\varepsilon \to 0$ आहे. तेथे दोन

चिन्हे बदल आहेत आणि म्हणून s-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात दोन पोल असल्याने सिस्टीम अन स्टेबल आहे म्हणजेच चिन्ह निगेटिव्ह आहे.

मेथड–II(Method-II): राउथच्या ॲरेच्या पहिल्या कॉलममधील शून्य घटकामुळे उद्भवणारी समस्या सोडवण्यासाठी दुसरी पद्धत देखील वापरली जाते, या पद्धतीत, कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन मध्ये 's' ची जागा 1/z ने घेतली आहे. कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन खालीलप्रमाणे आहे

$$F(s) = s^5+s^4+ 2s^3+2s^2 + 3s+ 5=0$$

आता s ला 1/z ने बदला त्यामुळे,

$$\frac{1}{z^5} + \frac{1}{z^4} + \frac{2}{z^3} + \frac{2}{z^2} + \frac{3}{z} + 5 = 0$$

टर्मची पुनर्रचना केल्याने आपल्याला $5z^5 + 3z^4 + 2z^3 + 2z^2 + z + 1 = 0$ मिळेल या

इक्वेशनसाठी राउथ ॲरे खालीलप्रमाणे

z^5	5	2	1
z^4	3	2	1
z^3	-4/3	-2/3	
z^2	½	1	
z^1	2		
z^0	1		

z-प्लेनसाठी राउथच्या ॲरेच्या पहिल्या कॉलममध्ये दोन चिन्हे बदल असल्याने, रूट z प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात स्थित आहेत म्हणून सिस्टीम अनस्टेबल आहे.

केस-II(Case-II):जर एका रो चे सर्व घटक शून्य असतील तर त्यामुळे पुढील रो चे घटक ठरवता येत नाहीत आणि राउथच्या ॲरेची चाचणी अयशस्वी होते.उदा. खाली दिलेल्या कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशनसाठी

$$F(s) = s^5 + s^4 + 3s^3 + 3s^2 + 3s + 3 = 0$$

दिलेल्या इक्वेशनसाठी राउथ ॲरे खालीलप्रमाणे

s^5	1	3	3
s^4	1	3	3
s^3	0	0	⟵Row of zero

येथे s^3 च्या रो मध्ये सर्व शून्य घटक आहेत, राउथ ची ॲरे चाचणी अयशस्वी झाली.समस्येवर मात करण्यासाठी s^4 रो च्या कोइफिशेंट पासून पॉलीनोमियल s सह एक ओक्झीलरी इक्वेशन तयार केले जाते, जे खालीलप्रमाणे आहे .

$$A(s) = s^4 + 3s^2 + 3$$

डिफरन्शिएटिंग इक्वेशन विथ रिस्पेक्ट टू s

$$\frac{dA(s)}{ds} = 4s^3 + 6s + 0$$

$$= 4s^3 + 6s$$

s^3 रोमधील शून्य आता कोइफिशेंट 4 आणि 6 ने बदलले आहे.
आता राउथ ॲरे खालीलप्रमाणे,

s^5	1	3	3
s^4	1	3	3
s^3	4	6	
s^2	3/2	3	
s^1	-2	0	
s^0	3		

पहिल्या कॉलममधील चिन्हामध्ये दोन बदल आहेत जे सिस्टीम अनस्टेबल असल्याचे दर्शविते.

3.4 राउथच्या क्रायटेरियाचे ॲप्लिकेशन्स: कंडीशनल स्टॅबिलिटी साठी के ची व्हॅल्यू काढणे,

Ex 3.4.1: युनिटी फीडबॅक सिस्टीम ओपन लूप ट्रान्सफर फंक्शनद्वारे वैशिष्ट्यीकृत आहे $G(s) = \frac{K(s+13)}{s(s+3)(s+7)}$ राउथ क्रायटेरिया चा वापर करून सिस्टीम स्टेबल होण्यासाठी के ची रेंज शोधा

सोलुशन: ओपन लूप ट्रान्सफर फंक्शन,

$$G(s) = \frac{K(s+13)}{s(s+3)(s+7)}$$

युनिटी फीडबॅक सिस्टीम असल्यामुळे

$$\therefore \quad H(s) = 1$$

कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन खालीलप्रमाणे ,

$$1 + G(s)\,H(s) = 0$$

$$1 + \frac{K\,(s+13)}{s\,(s+3)\,(s+7)} = 0$$

$$s\,(s+3)\,(s+7) + K\,(s+13) = 0$$

$$\therefore (s^2 + 3s)\,(s+7) + K\,(s+13) = 0$$

$$\therefore s^3 + 7s^2 + 3s^2 + 21s + Ks + 13K = 0$$

$$\therefore s^3 + 10s^2 + (21+K)\,s + 13K = 0$$

या इक्वेशन वरून,

$a_0=1, a_1=10, a_2=21+K, a_3=13K$

राउथ ॲरे खालीलप्रमाणे

s^3	1	21+K	0
s^2	10	13K	
s^1	$\frac{63-10K}{3}$	0	
s^0	13K		

स्टॅबिलिटीसाठी राउथ ॲरेच्या पहिल्या कॉलममधील सर्व घटक पॉझिटिव्ह असणे आवश्यक आहे.

i.e. $13K > 0$

आणि,

$$\frac{63-10K}{3} > 0$$

$K>0$

i.e. $63-10K > 0$

i.e. $63 > 10K$

i.e. $63/10 > K$

i.e. $6.3 > K$

म्हणून सिस्टीम स्टेबल होण्यासाठी K ची रेंज असेल,

$0 < K < 6.3$

Ex 3.4.2: एका सिस्टिमचे ट्रान्स्फर फंक्शन $G(s)H(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+4)(s+8)}$ हे आहे, त्यात K पॉझिटिव्ह आहे. तर

i) कॅरेक्टरिस्टीक इक्केशन शोधा व

ii) K ची रेंज शोधा

सोलुशन: क्लोज लूप ट्रान्स्फर फंक्शन,

$G(s).\ H(s) = 0$

तर i) कॅरेक्टरिस्टीक इक्केशन ,

$1+ G(s).H(s) = 0$

$$1 + \frac{K}{s(s+2)(s+4)(s+8)} = 0$$

$\therefore s\ (s+2)\ (s+4)\ (s+8) + K = 0$

$$(s^2 + 2s)(s^2 + 12s + 32) + k = 0$$

$$s^4 + 12s^3 + 32s^2 + 2s^3 + 24s^2 + 64s + K = 0$$

$$s^4 + 14s^3 + 56s^2 + 64s + K = 0$$

आणि ii) K ची रेंज

वरील इक्केशनवरून

$a_0=1$, $a_1=14$, $a_2=56$, $a_3=64$, and $a_4=K$

राउथ अॅरे हा,

s^4	1	56	K
s^3	14	64	0
s^2	$\frac{(14\times 56)-(1\times 64)}{14}=51.42$	$\frac{14K-0}{14}=K$	
s^1	$\frac{(51.42\times 64)-14K}{51.42}$	0	
s^0	K		

स्टॅबिलिटीसाठी राउथ अॅरेच्या पहिल्या कॉलममधील सर्व घटक पॉझिटिव्ह असणे आवश्यक आहे.*(>0)*

म्हणून s^0 घटकासाठी

$$K > 0$$

s^1 घटकासाठी

$$\frac{(51.42\times 64)-14K}{51.42}>0$$

$$\therefore 64 - 0.27\,K > 0$$

$$\therefore \quad 64 > 0.27\,K$$

$$\therefore \quad 64/0.27 > K$$

$$\therefore \quad 235.06 > K$$

सिस्टीम स्टेबल होण्यासाठी K ची रेंज असेल

$$0 < K < 235.06$$

कॅरेक्टरिस्टीक इक्वेशन K_{max} सह

$$s^4+14s^3+56s^2+64s+235.06=0$$

Ex. 3.4.3: राउथचा क्रायटेरिया वापरून खाली दिलेल्या इक्वेशनसाठी

i) एस-प्लेनच्या डाव्या अर्ध्या भागात किती रूट आहेत ते शोधा

ii) एस-प्लेनच्या उजव्या अर्ध्या भागात किती रूट आहेत ते शोधा

iii) आणि इमॅजीनरी ऍक्सिस वर किती रूट आहेत ते शोधा

$s^4+2s^2+1=0$

सोलुशन: $s^4+0s^3+2s^2+0s+1=0$ राउथ अॅरे हा,

s^4	1	2	1
s^3	0	0	

∴ केस –II नुसार

∴ इक्वेशन

$$A(s) = s^4+2s^2+1$$

$$\frac{dA(s)}{ds}=4s^3+4s$$

∴ राउथ अॅरे खालीलप्रमाणे

s^4	1	2	1
s^3	4	4	0
s^2	1	1	0
s^1	0	0	

झिरो असलेली रो आल्याकारणाने

$$A_1(s) = s^2+1=0$$

$$\frac{dA1(s)}{ds} = 2s$$

∴ राउथ अॅरे खालीलप्रमाणे

s^4	1	2	1
s^3	4	4	0
s^2	1	1	0
s^1	2	0	
s^0	1		

चिन्ह बदल नसल्यामुळे ,

$$A(s) = 0 \text{ i.e. } s^4+2s^2+1 = 0$$

$$s^2 = \frac{-2 \pm \sqrt{4-4}}{2} = -1, -1$$

$$s = \pm j, \pm j$$

∴ इमॅजीनरी ऍक्सिसवर असललेल्या रूट ची संख्या =4

s-प्लेन च्या उजव्या अर्ध्या भागात असलेल्या रूट ची संख्या=0

Question:

1. Define Stability. List out its Types. [R]
2. Identify whether the system is stable, marginally stable, or unstable for the given poles:
   a) s = −2, −3, −5 b) s = −2, −j3, +j3 c) s = −2,0,3 d) s = 2, −3, −4 [A]
3. Define stable and unstable system with its response and location of roots in s-plane. [U]
4. Give an example of a conditionally stable system and explain why it is conditionally stable. [A]
5. With the help of neat sketch show areas of root location for stable & unstable systems. [A]
6. Explain the concept of marginally stable system[U]
7. Define Relative Stability & Absolute Stability[R]
8. Explain necessary conditions for the stability of system of control system[U]
9. Determine Stability analysis for stable system[A]
10. Determine the stability of a system with poles at: s = −3, −2, −1 [A]
11. Distinguish between absolute stability and relative stability based on pole locations. [U]
12. Determine the stability of the following equations using Routh's Criterion $s^3+4s^2+8s+12= 0$[A]

13. Determine the stability of the following equations using Routh's Criterion i) $s^6+3s^5+5s^4+9s^3+8s^2+6s+4 = 0$ ii) $s^4+8s^3+24s^2+32s+16 = 0$ [A]
14. Explain the importance of relative stability in Routh's Criterion[U]
15. Find how many right-half plane poles exist for the system with the characteristic equation: $s^5+4s^4+3s^3+2s^2+s+1= 0$ [A]
16. A sign change in the first column of the Routh array indicate which type of system[U]
17. Explain Routh's criterion with one example [U]
18. State conditions for a system to be stable using the Routh array. [R]
19. A system has the characteristic equation: $s^3+4s^2+5s+2= 0$ Find the pole locations and determine if the system is stable. [A]
20. A unity feedback system is characterized by the open loop transfer function $G(s) = \frac{K(s+13)}{s(s+3)(s+7)}$ Find the range of K using Routh's criteria and determine if system is stable or conditionally stable.[A]
21. Given Characteristic equation s4+2s3+3s2+ (4+k) s+5= 0 construct the Routh array and determine the values of k for which the system is conditionally stable. [A]
22. A unity feedback control system with the open-loop transfer function: $G(s) = \frac{K}{(s+2)(s+5)}$ Find the range of K using Routh's criteria and determine if system is stable or conditionally stable. [A]
23. Find the range of K for conditional stability of the system with
    $s^4+4s^3+6s^2+(4+K)\, s+(1-K) = 0$ [A]

Unit 4 Process Control and Control Actions
प्रोसेस कंट्रोल अँड कंट्रोल ऍक्शन्स

विषय निष्पत्ती (CO): वेगवेगळ्या कंट्रोल ऍक्शनचा वापर करून विविध प्रोसेस ला कंट्रोल करणे

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

TLO 4.1 लेबल केलेल्या आकृतीसह प्रोसेस कंट्रोल सिस्टिम स्पष्ट करा.

TLO 4.2 वेगवेगळ्या कंट्रोल ऍक्शन्स चे वर्गीकरण करा.

TLO 4.3 वेगवेगळ्या कंट्रोल ऍक्शन्स मोडची तुलना त्यांच्या वेगवेगळ्या पॅरामीटर्सच्या आधारे करा.

4.1 प्रोसेस कंट्रोल सिस्टिम:

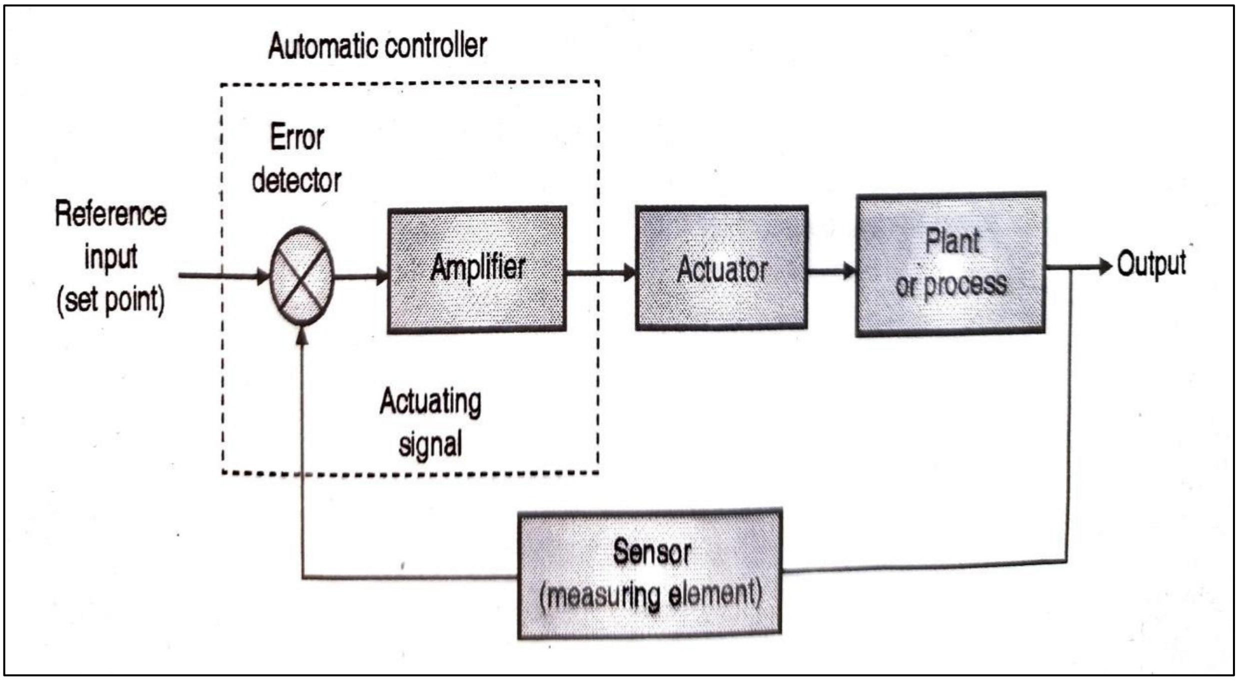


Fig. 4.1

प्रोसेस कंट्रोल सिस्टीम ची ब्लॉक डायग्रॅम

प्रोसेस कंट्रोल सिस्टिममध्ये प्रोसेस किंवा प्लांट, सेन्सर, एरर डिटेक्टर (Error detector), अटोमॅटिक (Automatic) कंट्रोलर, ऍक्चुएटर किंवा कंट्रोल युनिट असतात.

1. **प्रोसेस किंवा प्लांट**- प्रोसेस म्हणजे काही विशिष्ट उत्पादन क्रम. यात एक व्हेरिएबल किंवा मल्टीव्हेरिएबल आउटपुट असते. प्लांट किंवा प्रोसेस हा प्रोसेस कंट्रोल सिस्टीम चा एक महत्त्वाचा घटक आहे ज्यामध्ये प्रोसेसचे व्हेरिएबल नियंत्रित केले जाते.
2. **सेन्सर -** हे असे उपकरण आहे जे आउटपुट व्हेरिएबलला दुसऱ्या योग्य व्हेरिएबलमध्ये रूपांतरित करते जे एरर डिटेक्टरद्वारे स्वीकार्य असू शकते. क्लोज लूप सिस्टीमच्या फीडबॅक मार्गामध्ये सेन्सर उपस्थित असते.
3. **एरर डिटेक्टर**-एरर डिटेक्टर हा एक समिंग पॉइंट आहे ज्याचे आउटपुट एक एरर सिग्नल आहे. म्हणजेच, $e(t) = r(t) - b(t)$ कंट्रोलरकडे तुलना आणि करेक्टिव्ह ऍक्शन्स साठी. एरर डिटेक्टर वास्तविक सिग्नल आणि रेफरन्स इनपुट म्हणजेच सेट पॉइंट दरम्यान तुलना करतो.

4. **अटोमॅटिक कंट्रोलर-** कंट्रोलर एरर सिग्नलला ओळखतो, जो सहसा खूप कमी पॉवर लेव्हलवर असतो आणि तो पुरेशा उच्च पातळीवर वाढवतो म्हणजे स्वयंचलित कंट्रोलरमध्ये एरर डिटेक्टर आणि ॲम्प्लिफायरचा समावेश असतो.
5. **ऍक्चुएटर किंवा कंट्रोल युनिट -** ऍक्चुएटर म्हणजे न्यूम्याटिक मोटर किंवा व्हॉल्व, हायड्रॉलिक मोटर किंवा इलेक्ट्रिक मोटर, जी कंट्रोलरकडून मिळणाऱ्या कंट्रोल सिग्नलनुसार प्लांटला इनपुट देते.

4.2 कंट्रोल ऍक्शन मोड:

4.2.1 कंट्रोलर बद्दलची माहिती: कंट्रोलर हा एक महत्वाचा घटक आहे जो काही स्वरूपात एरर्स स्वीकारतो आणि योग्य सुधारात्मक कृती) Control action) ठरवतो. कंट्रोलरचे आउटपुट नंतर प्रोसेस किंवा अंतिम कंट्रोल इलेमेंटला लागू केले जाते, जे आउटपुटला त्याच्या इच्छित सेट पॉइंटवर परत आणते. कंट्रोलर हे कंट्रोल सिस्टीमचे हृदय आहे. संपूर्ण प्रणालीची अचूकता ही एरर शोधण्यासाठी नियंत्रक किती संवेदनशील) sensitive) आहे आणि अशा एरर्सला ते कसे हाताळत आहे यावर अवलंबून असते. एरर्स हाताळण्यासाठी कंट्रोलरचे स्वतःचे लॉजिक असते.

4.2.2 कंट्रोलरची आवश्यकता:

1. ह्यूमन एफर्ट्स कमी करण्यासाठी.
2. मशीनमधून जास्तीत जास्त कार्यक्षमता मिळवणे आणि ह्यूमन लॉजिक लावून कंट्रोल करणे.
3. संपूर्ण सिस्टीमची कॉम्प्लेक्स सर्किटरी कमी करण्यासाठी.
4. इनफ्लेक्सिबल, रिले-नियंत्रित प्रणालींशी संबंधित उच्च खर्च दूर करण्यासाठी.
5. मानवी ऑपरेटरला पर्यायी व्यवस्था (धोकादायक वातावरण आणि मानवी क्षमतेच्या पलीकडे).

4.2.3 कंट्रोल ऍक्शन्स:

कंट्रोल ऍक्शन ही कंट्रोलरद्वारे तयार केली जाते आणि ती एरर सिग्नलनुसार ॲक्च्युएटरला दिली जाते, ज्यामुळे ॲक्च्युएटर सक्रिय होतो आणि एरर सिग्नल कमी करण्यासाठी कार्य करतो.

कंट्रोल ऍक्शन्सचे खालील तीन प्रकार आहेत:

1. कंटिन्युअस कंट्रोल ऍक्शन मोड
2. डिसकंटिन्युअस कंट्रोल ऍक्शन मोड
3. कम्पोझिट कंट्रोल ऍक्शन मोड

4.2.4 कंट्रोल ॲक्शनचे वर्गीकरण:

वर नमूद केल्याप्रमाणे कंट्रोल ऍक्शन्स चे वर्गीकरण खालील fig. 4.2 नुसार 3 मोड्स मध्ये होते.

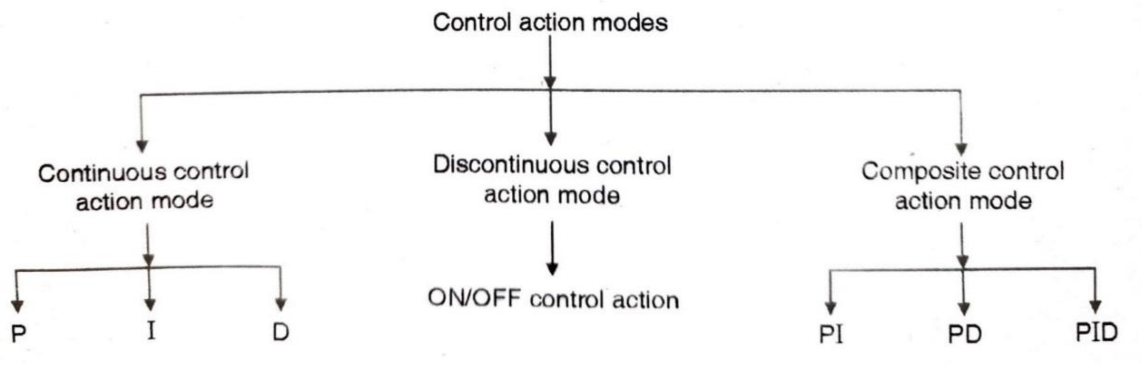


Fig. 4.2
क्लासिफिकेशन ऑफ कंट्रोल सिस्टीम

येथे,

P - प्रपोर्शनल
I - इंटिग्रल
D - डेरिव्हेटिव्ह

4.3 डिसकंटिन्युअस कंट्रोल ऍक्शन मोड: या प्रकारच्या कंट्रोल अ‍ॅक्शन मोड (Control Action Mode) मध्ये, इनपुट एरर सिग्नल (Error Signal) मधील बदलांसाठी कंट्रोलर आउटपुटमध्ये असतत (डिसकंटिन्युअस) बदल होतात. यामध्ये कंट्रोल एलिमेंटचे दोन पोझिशन्स नियंत्रित करावे लागतात, ON (ऑन) किंवा OFF (ऑफ), म्हणून याला ON-OFF Controller (ऑन-ऑफ कंट्रोलर) असे देखील म्हटले जाते. हा सर्वात सोपा आणि स्वस्त मोड आहे, त्यामुळे जर ह्या मोड ला त्याच्या टॉलरन्स लिमिट मध्ये ठेवले , तर हा मोड औद्योगिक (Industrial) आणि घरगुती (Domestic) कंट्रोल सिस्टिम्स मध्ये सामान्यतः वापरला जातो.

4.3.1 ऑन-ऑफ कंट्रोल अ‍ॅक्शन चे वर्किंग प्रिंसिपल: जेव्हा Measured Variable (मोजलेले व्हेरिएबल) हे Set Point (सेट पॉइंट) पेक्षा कमी असेल, तर कंट्रोलर ऑन होतो आणि आउटपुट सिग्नल जास्तीत जास्त सिग्नल देतो. आणि जेव्हा Measured Variable (मोजलेले व्हेरिएबल) हे Set Point सेट पॉइंट पेक्षा जास्त असेल तेव्हा कंट्रोलर ऑफ होतो आणि आउटपुट शून्य (Zero) देतो.

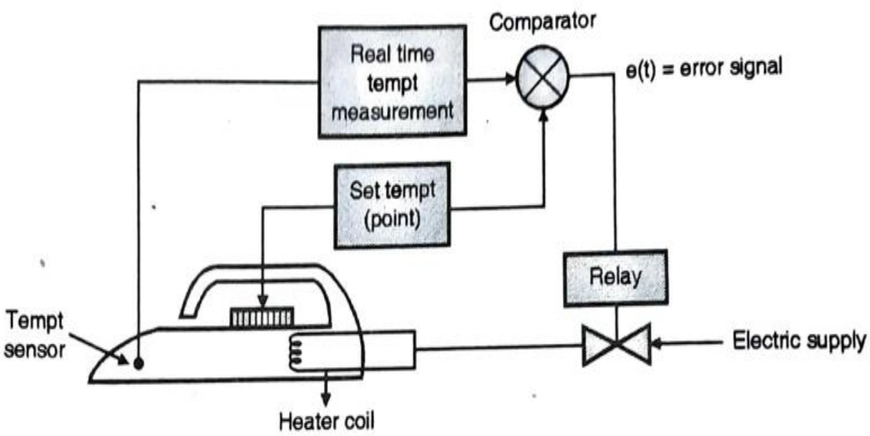


Fig. 4.3
ऑटोमॅटिक इलेक्ट्रिक इस्त्री, ऑन-ऑफ ऍक्शन मोडचे एक उदाहरण

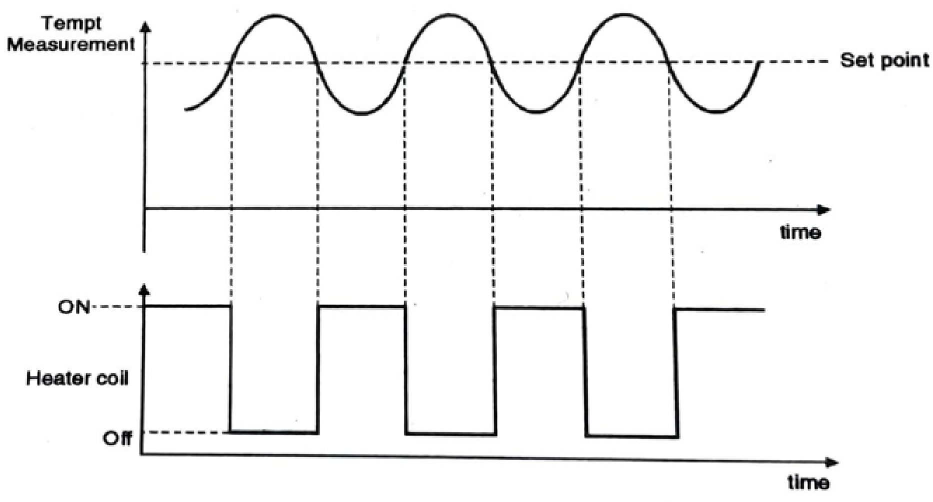


Fig. 4.4
ऑन-ऑफ कंट्रोल ऍक्शन मोडच्या वेव्हफॉर्म्स

Fig. 4.3 मध्ये Iron (इस्त्री) दाखवली आहे, जी ऑन/ऑफ कंट्रोल ॲक्शनचे एक उदाहरण आहे. या सिस्टीममध्ये आउटपुटच्या केवळ दोन अवस्था असतात, म्हणजेच Heater Coil (हीटर कॉइल) फक्त ऑन किंवा ऑफ होते.

या ठिकाणी, रीअल-टाइम टेम्परेचर ची सेट पॉइंटशी तुलना केली जाते आणि त्या आधारावर कंट्रोलर एरर सिग्नल तयार करतो, जो रिले ला सक्रिय करण्यासाठी वापरला जातो. रिले ऑन/ऑफ करून रिले कॉइलचा विद्युत पुरवठा नियंत्रित करतो.

Fig. 4.4 मध्ये मापनाच्या (Measurement) संदर्भात हीटर कॉइल ची स्थिती दर्शवलेली आहे.

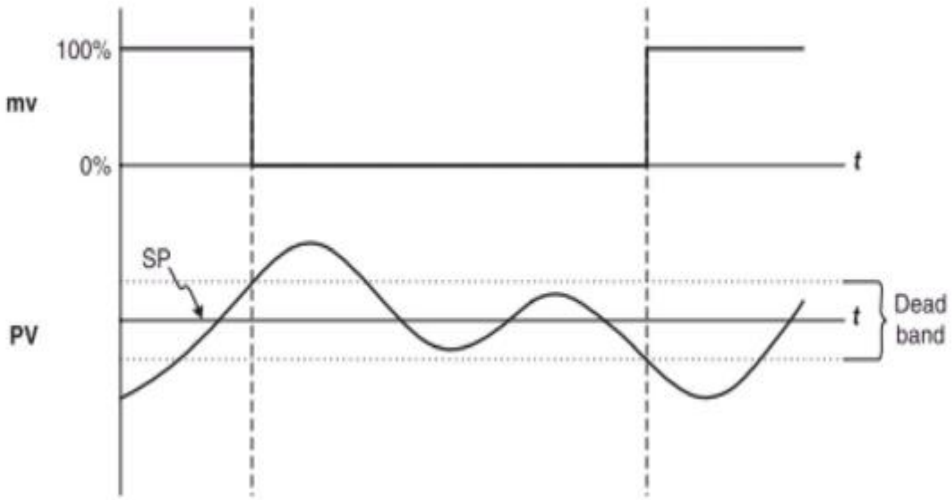


Fig. 4.5
ऑन-ऑफ कंट्रोल ऍक्शन मोडचा डेड बँड सहितच रिस्पॉन्स

Fig. 4.5 मध्ये दाखवल्याप्रमाणे, ऑन/ऑफ कंट्रोलरसाठी डेड बँड म्हणजे सेट पॉइंटभोवतीची एक छोटी श्रेणी आहे, जिथे कंट्रोलर सक्रिय होत नाही. याचा अर्थ, मोजलेल्या मूल्यात (Measured Value) थोडासा बदल झाला तरी आउटपुटमध्ये कोणताही बदल होत नाही.

मुळात, ही एक बफर झोन आहे, जी मोजलेल्या मूल्यातील लहान चढ-उतारांमुळे कंट्रोलर सतत ऑन आणि ऑफहोण्यापासून रोखते. यामुळे सिस्टीममध्ये वियर आणि टियर)Wear and Tear) कमी होतो आणि उपकरणाचे आयुष्य वाढते.

4.3.2 ऑन/ऑफ कंट्रोलरचे आउटपुट समीकरण

गणितीयदृष्ट्या, हे खालीलप्रमाणे व्यक्त करता येते,

$$P(t) = 0\%\ (OFF) \qquad for\ e_p < 0$$
$$= 100\%\ (ON) \qquad for\ e_p > 0$$

जेथे,

P (t) – आउटपुट सिग्नल

e_p – एरर सिग्नल, जो मोजलेल्या व्हेरेबल आणि सेट पॉइंटमधील फरक दर्शवतो.

म्हणूनच, जर एरर एका विशिष्ट क्रिटिकल व्हॅल्यू पेक्षा जास्त झाली, तर आउटपुट 0% वरून 100% वर बदलतो. आणि जर एरर त्या विशिष्ट क्रिटिकल व्हॅल्यू पेक्षा कमी झाला, तर आउटपुट 100% वरून 0% वर खाली येतो.

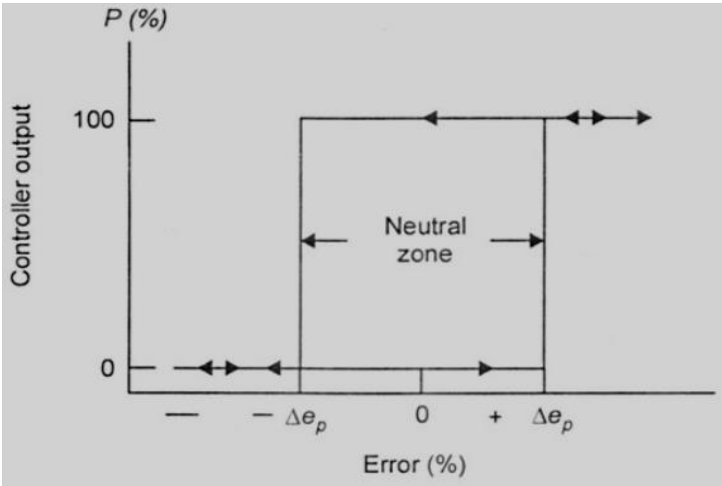


Fig. 4.6
टू पोझिशन कंट्रोलर मधील न्यूट्रल झोन

4.3.3 ऑन/ऑफ कंट्रोलर न्यूट्रल झोन: प्रॅक्टिकल इम्प्लिमेंटेशनमध्ये, टू-पोझिशन कंट्रोलर (ऑन/ऑफ कंट्रोलर) मध्ये, जेव्हा e (t) शून्याच्या माध्यमातून वाढते किंवा कमी होते तेव्हा एक ओव्हरलॅप होते. या कालावधीत, कंट्रोलर आउटपुटमध्ये कोणताही बदल होत नाही, जे Fig. 4.6 मध्ये दाखवले आहे. जोपर्यंत वाढत्या एररमध्ये Δe(t) शून्याच्या वर बदल होत नाही, तोपर्यंत कंट्रोलर आउटपुटची स्थिती बदलणार नाही. कमी होताना, ते शून्याच्या खाली Δe(t) पर्यंत पडेपर्यंत कंट्रोलर 0% वर बदलणार नाही.

2Δe (t) या श्रेणीला न्यूट्रल झोन किंवा डिफरेंशियल गॅप असे संबोधले जाते.

टू-पोझिशन कंट्रोलर हे जाणूनबुजून न्यूट्रल झोनसह डिझाइन केले जातात, ज्यामुळे अतिरिक्त सायकलिंग टाळता येते. अशा न्यूट्रल झोनचे अस्तित्व हे सिस्टीममधील डिझायरेबल हिस्टेरिसीसचे एक उदाहरण आहे.

4.4 कंटिन्युअस मोड: कंटिन्युअस कंट्रोल मोडमध्ये, कंट्रोलर आउटपुट एरर किंवा रेट ऑफ चेंज ऑफ एरर म्हणजेच वेळेनुसार बदलणाऱ्या एरर च्या प्रपोर्शनने बदलते. हा मोड डिस्कंटिन्युअस कंट्रोलर मोडचे विस्तारित रूप आहेत. बहुतेक औद्योगिक प्रक्रियांमध्ये, एक किंवा अनेक कंटिन्युअस कंट्रोलरच्या कॉमोबिनेशनला प्राधान्य दिले जाते. कंटिन्युअस कंट्रोल सिस्टीममध्ये, कंट्रोलर सतत डिझायर्ड सेट पॉईंट आणि मेजर्ड प्रोसेस व्हेरिएबल यामधील एररचे कॅल्क्युलेशन करतो कंटिन्युअस कंट्रोल सिस्टीममध्ये, कंट्रोलर सतत डिझायर्ड सेट पॉईंट आणि मेजर्ड प्रोसेस व्हेरिएबल यामधील एररचे कॅल्क्युलेशन करतो. नंतर तो या एररला कमी करण्यासाठी एक सुधारात्मक क्रिया लागू करतो. यामुळे वेळोवेळी व्हेरिएबल्सचे अधिक अचूक आणि स्थिर नियंत्रण होते, ज्यामुळे अनेक औद्योगिक ॲप्लिकेशन्स मध्ये सिस्टीमची कार्यक्षमता सुधारते.

कंटिन्युअस मोडचे 3 प्रकार आहेत:

1. प्रपोर्शनल (P) कंट्रोल
2. इंटिग्रल)I) कंट्रोल
3. डेरिव्हेटिव्ह)D) कंट्रोल

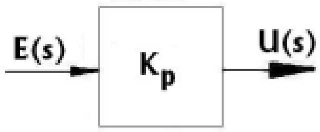


Fig. 4.7
प्रपोर्शनल कंट्रोलर

4.4.1 प्रपोर्शनल (P) कंट्रोल :

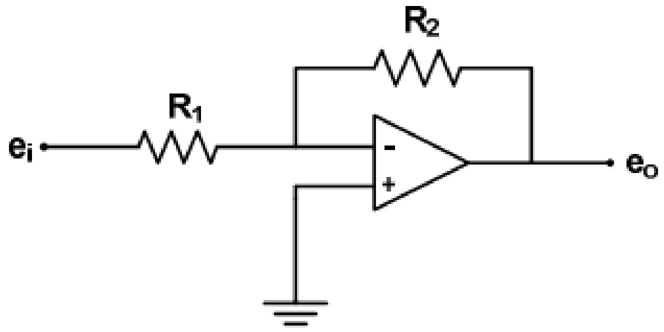


Fig. 4.8
ओप-अँप चा वापर करून प्रपोर्शनल कंट्रोलर

प्रपोर्शनल कंट्रोल हा एक फीडबॅक कंट्रोलचा प्रकार आहे. हा कंटिन्युअस कंट्रोलचा सर्वात सोपा प्रकार आहे, जो क्लोज्ड-लूप सिस्टीममध्ये वापरला जाऊ शकतो.

P-ओन्ली कंट्रोल प्रोसेस व्हेरिएबलमधील चढउतार कमी करतो, परंतु तो नेहमी सिस्टीमला डिझायर्ड सेट पॉईंटवर आणत नाही. हा इतर बहुतेक कंट्रोलर्सपेक्षा वेगवान प्रतिसाद देतो, सुरुवातीला P-ओन्ली कंट्रोलर काही सेकंद अगोदर प्रतिसाद देऊ शकतो. तथापि, जसजशी सिस्टीम अधिक कॉम्प्लेक्स होते (म्हणजे अधिक कॉम्प्लेक्स अल्गोरिदम), तसतसा रिस्पॉन्स टाइम मधील फरक जमा होतो, ज्यामुळे P-कंट्रोलर काही मिनिटे अगोदरच प्रतिसाद देऊ शकतो.

0% ते 100% कंट्रोलर आउटपुट कव्हर करण्यासाठीच्या एररच्या श्रेणीला प्रपोर्शनल बँड म्हणतात, कारण वन टू वन कम्युनिकेशन फक्त या रेंजमधील एररसाठी अस्तित्वात आहे. हा मोड खालीलप्रमाणे व्यक्त केला जाऊ शकतो:

$$P = K_p e_p + P_0$$

येथे,

- K_p = एरर आणि कंट्रोलर आउटपुट दरम्यान प्रोपोर्शनल गेन (% प्रति %)
- P_0 = एरर नसताना किंवा शून्य एरर असताना कंट्रोलर आउटपुट (%)

जरी P-ओन्ली कंट्रोलर रिस्पॉन्स टाइम फास्ट असला तरी, तो सेट पॉईंटपासून डेव्हिएशन निर्माण करतो. या डेव्हिएशनला ऑफसेट म्हणतात, आणि साधारणपणे प्रोसेस मध्ये हे डेव्हिएशन येणे अपेक्षित नसते.

ऑफसेट: प्रपोर्शनल कंट्रोल मोडचे एक महत्त्वाचे वैशिष्ट्य म्हणजे, जेव्हा लोड चेंज होतो तेव्हा तो कंट्रोल केलेल्या व्हेरिएबलच्या ऑपरेटिंग पॉईंटवर एक कायमस्वरूपी रेसिड्युअल एरर निर्माण करतो, यालाच ऑफसेट म्हणतात. हा ऑफसेट लार्ज K_p कॉन्स्टंटद्वारे कमी केला जाऊ शकतो , ज्यामुळे प्रोपोर्शनल बँड देखील कमी होतो.

प्रपोर्शनल बँड (PB): प्रपोर्शनल बँड म्हणजे कंट्रोलर आउटपुटचा असा बँड, ज्यामध्ये फायनल कंट्रोल एलिमेंट एका टोकापासून दुसऱ्या टोकापर्यंत हलते. गणितीयदृष्ट्या, ते खालीलप्रमाणे व्यक्त केले जाऊ शकते:

$$PB = \frac{100}{K_p}$$

म्हणून, जर प्रपोर्शनल गेन खूप जास्त असेल, तर प्रपोर्शनल बँड खूप लहान असेल.

किंवा

प्रपोर्शनल बँड (PB): जेव्हा कंट्रोलर आउटपुटमध्ये 100% बदल होतो, हा बदल परसेंटेज एरर च्या फॉर्म मध्ये डिफाइन केला जातो, त्यालाच प्रपोर्शनल बँड म्हणतात.

P-ओन्ली कंट्रोलला I किंवा D कंट्रोलसारख्या दुसऱ्या कंट्रोल प्रकारासह एकत्र करून ऑफसेट कमी केला जाऊ शकतो. तथापि, हे लक्षात घेणे महत्त्वाचे आहे की ऑफसेट पूर्णपणे काढून टाकणे अशक्य आहे, कारण तो प्रत्येक समीकरणात अंतर्भूत असतो.

प्रपोर्शनल कंट्रोल मोडचा सारांश खालीलप्रमाणे दिला जाऊ शकतो:

i. प्रपोर्शनल कंट्रोलरमध्ये, ॲक्ट्युएशन सिग्नल सिस्टीम डेव्हिएशनच्या प्रपोर्शनमध्ये असतो.

ii. जर सिस्टीम डेव्हिएशन जास्त असेल, तर मॅनिप्युलेटेड व्हेरिएबलची व्हॅल्यू ही जास्त असते.

iii. जर सिस्टीम डेव्हिएशन कमी असेल, तर मॅनिप्युलेटेड व्हेरिएबलची व्हॅल्यू ही कमीच असते.

iv. आयडियल स्थितीत P कंट्रोलरचा टाइम रिस्पॉन्स इनपुट व्हेरिएबलसारखाच असतो.

एप्लिकेशन्स:

प्रपोर्शनल कंट्रोलर योग्य ठरू शकतो जेथे:

1. ऑपरेटिंग पॉईंटचे मॅन्युअल रीसेट करणे शक्य आहे.
2. लोड मधील बदल कम आहेत.
3. सिस्टीममध्ये अस्तित्वात असलेला डेड टाइम कमी आहे.

4.4.2 इंटिग्रल) I) कंट्रोल

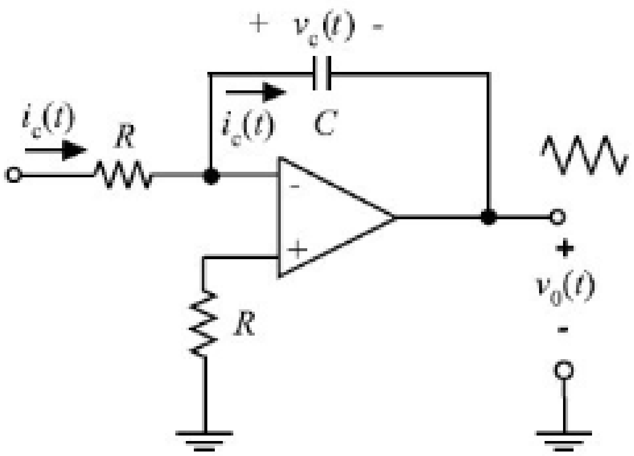


Fig.4.9

ओप-अँप चा वापर करून इंटिग्रल कंट्रोलर

दुसऱ्या प्रकारचा कंटिन्युअस ॲक्शन मोड म्हणजे इंटिग्रल कंट्रोल. इंटिग्रल कंट्रोल हा फीडबॅक कंट्रोलचा दुसरा प्रकार आहे. हा सहसा वापरला जातो कारण तो अस्तित्वात असलेली कोणतीही विचलने) Deviations) काढू शकतो.

इंटिग्रल ॲक्शन एररची वेळेनुसार बेरीज करून, त्या बेरजेला गेनने गुणाकार करून, आणि त्याचा परिणाम सध्याच्या कंट्रोलर आउटपुटमध्ये जोडून प्रदान केले जाते. आपण पाहू शकता की, जर एरर रँडमली शून्याच्या वर आणि खाली विचलित होत असेल, तर ॲव्हरेज बेरीज शून्य होते, त्यामुळे इंटिग्रल ॲक्शन

काहीही योगदान देणार नाही. परंतु जर एरर वाढत्या कालावधीसाठी सकारात्मक किंवा नकारात्मक होत असेल, तर इंटिग्रल ॲक्शन जमा होऊ लागेल आणि कंट्रोलर आउटपुटमध्ये बदल करेल.

कंटिन्युअस फंक्शन्सच्या गणितामध्ये, जसे की येथे एरर, बेरीज ही इंटिग्रेशनद्वारे दर्शविली जाते. म्हणून, हा मोड एका इंटिग्रल समीकरणाद्वारे दर्शविला जातो:

$$P(t) = K_I \int_0^t e_P \, dt + P(0)$$

येथे, P (0) हे कंट्रोलर आउटपुट आहे जेव्हा इंटिग्रल ॲक्शन सुरू होते.

गेन K_I हे दर्शवते की एररच्या प्रत्येक पर्सेंट टाइम जमा होण्यासाठी किती टक्के कंट्रोलर आउटपुट आवश्यक आहे

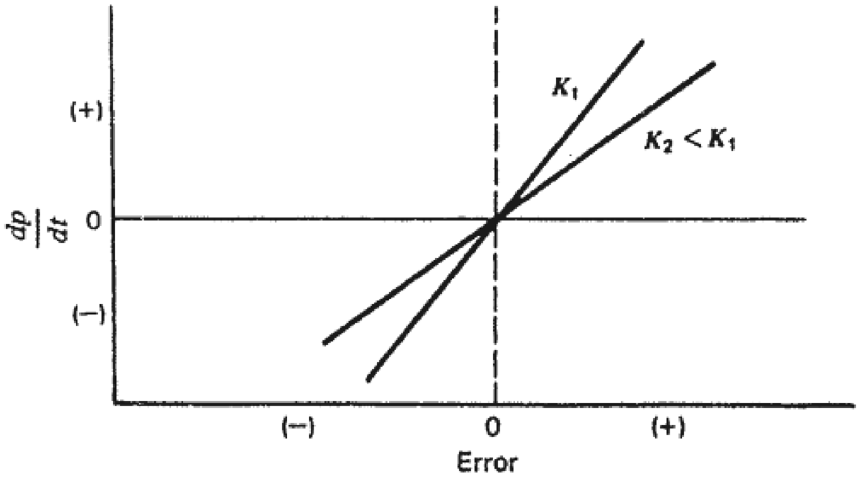


Fig. 4.10
रेट ऑफ आऊटपूट डिपेंडंस ऑन एरर

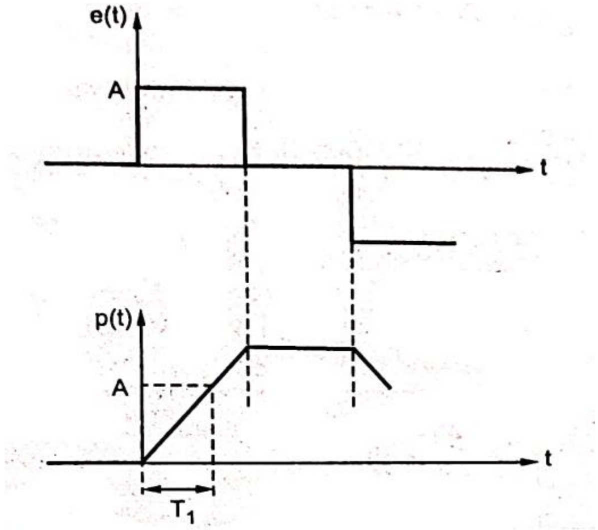


Fig. 4.11
स्टेप रिस्पॉन्स ऑफ इंटिग्रल कंट्रोल मोड

इंटिग्रल कंट्रोल ॲक्शनचे फायदे:

1. हा स्टेडी स्टेट एररला कमी करतो, म्हणजेच ऑफसेटचा परिणाम कमी करतो.

2. एरर जनरेट झाल्यानंतर विशिष्ट वेळीहा हाय कंट्रोल्ड आउटपुट प्रदान करतो, विशेषत: जेव्हा K_I चे मूल्य हाय असते.
3. हा डेव्हिएशनच्या कन्टीन्यूएड एक्सिस्टन्सला रीस्पॉन्ड करतो.

इंटिग्रल कंट्रोल ॲक्शनचे तोटे:

१. सहसा स्वतंत्रपणे वापरला जात नाही आणि प्रोपोर्शनल कंट्रोलर्ससह एकत्रितपणे वापरले जातो.
२. हा ऑस्सीलेटरी रिस्पॉन्सला सिस्टीमला अस्थिर करतो.
३. हा सिस्टीम रिस्पॉन्समध्ये त्याच्या स्टेडी स्टेटकंडिशन च्या अवती-भोवती हंटिंग म्हणजेच ऑस्सीलेशन्स तयार करतो.

एप्लिकेशन्स:

इंटिग्रल नियंत्रक योग्य ठरू शकतो जेथे:

1. औद्योगिक प्रक्रिया जसे की तापमान नियंत्रण, लिक्विड लेव्हल नियंत्रण, प्रेशर रेग्युलेट करणे, मोटर स्पीड नियंत्रण.
2. ज्या परिस्थितीत खूप जास्त अचूक नियंत्रण आवश्यक आहे, जसे की एरोस्पेस इंजिनियरिंग, बायोमेडिसिन आणि उत्पादन.
3. अशी कोणतीही सिस्टीम जिथे वेळेनुसार अचूक सेटपॉईंट राखणे अवघड आहे आणि अगदी छोट्या डेव्हिएशन्सला पूर्णपणे सुधारणे किंवा काढून टाकणे आवश्यक आहे.

4.4.3 डेरिव्हेटिव्ह (D) कंट्रोल:

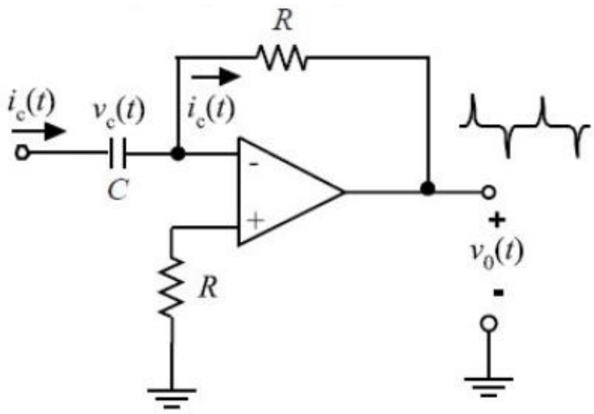


Fig.4.12
ओप-अँप चा वापर करून डेरिव्हेटीव्ह कंट्रोलर

प्रॅक्टिसमध्ये एरर हि वेळेशी निगडित असते आणि एका विशिष्ट क्षणी ती शून्यही होऊ शकते. परंतु ती त्या क्षणानंतर कायमची शून्य राहणार नाही. म्हणून रेट ऑफ चेंज ऑफ एररशी संबंधित काही ॲक्शन आवश्यक आहे. अशा प्रकारच्या कंट्रोलरला डेरिव्हेटिव्ह कंट्रोलर म्हणतात.

या मोडमध्ये, कंट्रोलरचे अक्चुअल एररच्या रेट ऑफ चेंज ऑफ टाइमवर (Rate of change of time) अवलंबून असते. म्हणून याला रेट ॲक्शन मोड किंवा अँटिसिपेटरी ॲक्शन मोड असेही म्हणतात.

या मोडसाठीचे गणितीय समीकरण खालील प्रमाणे आहे:

$$P(t) = K_D \frac{d\,e_p}{dt}$$

येथे,

गेन, K_D = डेरिव्हेटिव्ह गेन कॉन्स्टन्ट हा आपल्याला सांगतो की एररच्या प्रत्येक D पर्सेंट पर सेकंद बदलाच्या आधारावर कंट्रोलर आउटपुटला किती टक्के बदलावे लागेल.

डेरिव्हेटिव्ह ॲक्शन स्वतंत्रपणे वापरली जात नाही कारण ती एरर स्थिर असताना म्हणजेच कॉन्स्टन्ट असताना कोणतेही आउटपुट प्रदान करत नाही.

Fig. 4.13 मध्ये दर्शविल्याप्रमाणे, डेरिव्हेटिव्ह ॲक्शन एररच्या बदलाच्या दरानुसार कंट्रोलर आउटपुट कसे बदलते ते दर्शवित आहे. या उदाहरणासाठी, असे गृहीत धरले आहे की कंट्रोलरचे आउटपुट कोणतीही एरर नसतांना 50% आहे. जेव्हा एरर खूप वेगाने पॉसिटीव्ह स्लोपने बदलते, तेव्हा आउटपुटमध्येही मोठा बदल होतो, आणि जेव्हा एरर बदलत नाही, तेव्हा आउटपुट 50% वर परत येते. शेवटी, जेव्हा एरर कमी होत जाते, म्हणजे जेव्हा एरर निगेटिव्ह स्लोप ने बदलते, तेव्हा कंट्रोलरच्या आउटपुट मध्ये खंडितपणे कमी बदल घडतो.

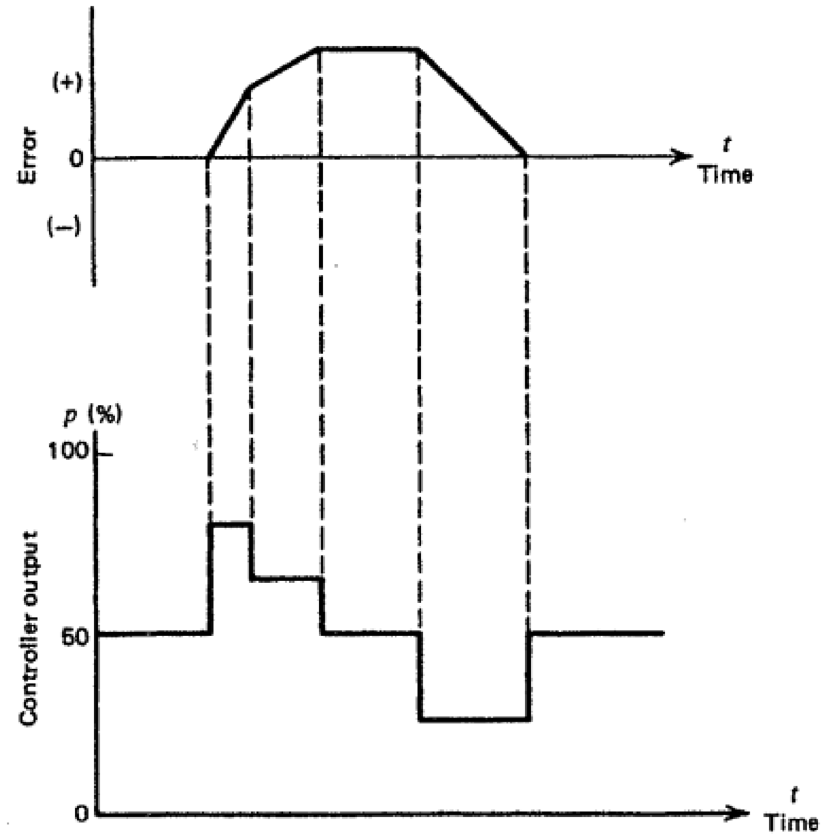


Fig. 4.13

डेरिव्हेटीव्ह मोड ॲक्शन चेंजेस डिपेंडींग ऑन द रेट ऑफ एरर

डेरिव्हेटिव्ह मोड काळजीपूर्वक आणि सहसा लहान गेनसाठी वापरला जाणे आवश्यक आहे, कारण एरर मधील रॅपिड बदलामुळे कंट्रोलरच्या आउटपुटमध्ये खूप मोठे, अचानक बदल होऊ शकतो. अशा घटनेमुळे अस्थिरता (Instability) निर्माण होऊ शकते.

डेरिव्हेटिव्ह कंट्रोल मोडचा सारांश खालीलप्रमाणे दिला जाऊ शकतो:

i. जर एरर शून्य असेल किंवा एरर वेळेनुसार स्थिर असेल, तर मोड कोणतेही आउटपुट प्रदान करत नाही.

ii. जर एरर असेल, तर एररच्या प्रत्येक 1%-प्रति-सेकंद बदलाच्या दरासाठी, हा मोड K_D टक्के आउटपुट देतो.

iii. डायरेक्ट ॲक्शनसाठी, एररच्या पॉसिटीव्ह बदलाच्या आधारावर डेरिव्हेटिव्ह मोड पॉसिटीव्ह आउटपुट निर्माण करतो.

ॲप्लिकेशन्स:

1. प्रामुख्याने अशा ॲप्लिकेशन्समध्ये वापरला जातो जेथे एरर मधील थोडा बदल झाला तरी रॅपिड रिस्पॉन्स आवश्यक असतो, जसे की मोशन कंट्रोल सिस्टीम (रोबोटिक आर्म्स), टेम्परेचर कंट्रोल लूप, टँकमधील लिक्विड लेवल कंट्रोल आणि मोटर्सच्या गतीचा कंट्रोल.

4.5 कंपोझीट कंट्रोल ॲक्शन: डिसकंटिन्युअस आणि कंटिन्युअस कंट्रोलर मोडमधून असे आढळून आले आहे की प्रत्येक मोडचे स्वतःचे फायदे आणि तोटे आहेत. कॉम्प्लेक्स इंडस्ट्रिअल प्रोसेसमध्ये यापैकी बहुतेक कंट्रोल मोड्स अपेक्षित कंट्रोल आउटपुट देऊ शकत नाहीत. अशा वेळी वैयक्तिक कंट्रोल मोड्स एकत्र करणे शक्य आणि उपयुक्त आहे, ज्यामुळे प्रत्येक मोडचे स्वतः चे फायदे मिळतात. काही केसेसमध्ये, एक अतिरिक्त फायदा असा आहे की मोडच्या वैयक्तिक मर्यादा दूर होतात. सर्वात सामान्यपणे वापरले जाणारे कंपोझीट कंट्रोल ॲक्शन आहेत:

प्रपोर्शनल-इंटिग्रल (PI),

प्रपोर्शनल-डेरिव्हेटिव्ह (PD) आणि

प्रपोर्शनल-इंटिग्रल-डेरिव्हेटिव्ह (PID) कंट्रोल मोड.

4.5.1 प्रपोर्शनल-इंटिग्रल कंट्रोल मोड (P-I मोड):

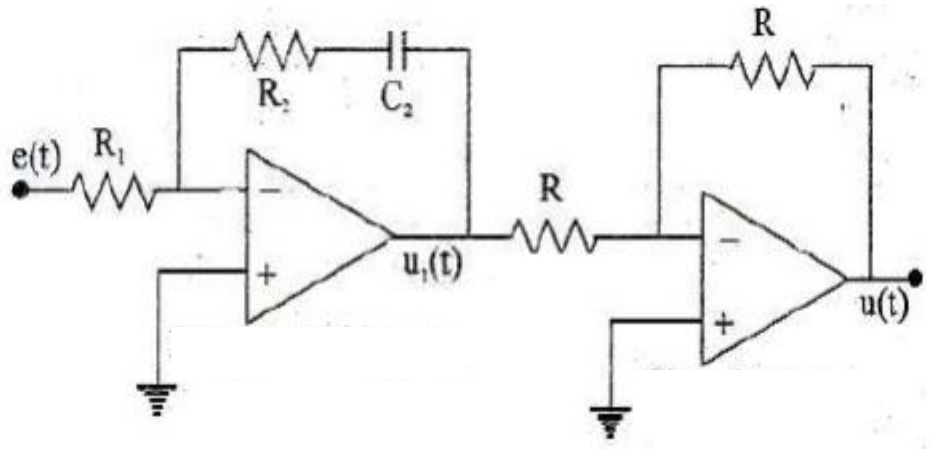


Fig. 4.14

ओप-अँप चा वापर करून P-I कंट्रोलर

[Courtesy: “Control Systems” by Nagoor Kani, Page: 2.84]

या कंपोझीट कंट्रोल ॲक्शन मोडचा मुख्य फायदा असा आहे की प्रपोर्शनल कंट्रोल मोडचे सर्व फायदे यात उपलब्ध आहेत आणि इंटिग्रल मोड आधी पासून असलेला ऑफसेट दूर करतो.

या कंट्रोल ॲक्शनसाठी प्रोपोर्शनल आणि इंटिग्रल समीकरणांना एकत्र सिरीज मध्ये जोडले जाते, त्याचे एकत्रित समीकरण खालील प्रमाणे:

$$P(t) = K_P e_P + K_P K_I \int_0^t e_P \, dt + P_I(0)$$

वरील समीकरणावरून हे पाहिले जाऊ शकते की प्रपोर्शनल गेन इंटिग्रेशन मोड गेन देखील बदलतो, परंतु इंटिग्रेशन गेन, K_I स्वतंत्रपणे ॲडजस्ट केला जाऊ शकतो. प्रोपोर्शनल मोड स्वतंत्रपणे वापरल्यावर लोड बदल झाल्यास ऑफसेट एरर निर्माण करतो आणि त्यामुळे कंट्रोलर आउटपुट शून्य एरर प्रदान करणार नाही. परंतु PI मोडमध्ये, इंटिग्रल फंक्शन आवश्यक असे नवीन कंट्रोलर आउटपुट प्रदान करते, ज्यामुळे

लोड बदल झाल्यानंतर एरर शून्य होते. इंटिग्रल फीचर लोड बदल झाल्यानंतर शून्य एरर आउटपुट रीसेट करते.

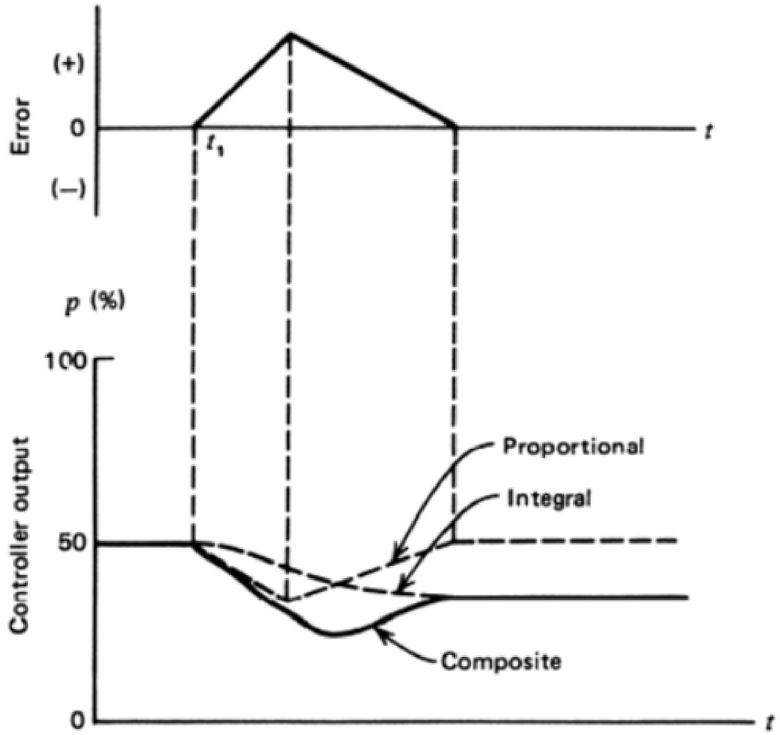


Fig. 4.14

P-I ऍक्शन शोइंग द रिसेट ऍक्शन ऑफ द इंटिग्रल कन्फिगरेशन

4.5.2 प्रपोर्शनल-डेरिव्हेटिव्ह कंट्रोल मोड (P-D मोड):

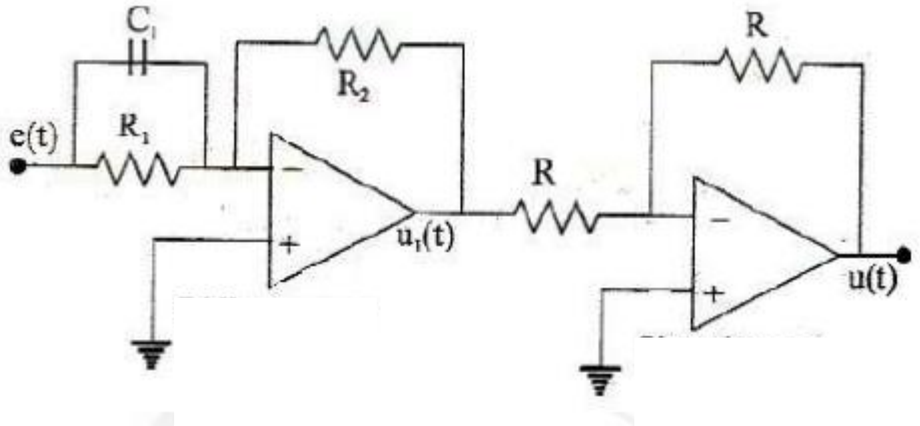


Fig. 4.15

ओप-अँप चा वापर करून P-D कंट्रोलर

[Courtesy: "Control Systems" by Nagoor Kani, Page: 2.86]

कंट्रोल मोडचे आणखी एक कॉम्बिनेशन म्हणजे PD-कंट्रोल, जे फीड-फॉरवर्ड आणि फीडबॅक कंट्रोलचे कॉम्बिनेशनआहे, कारण ते सध्याच्या प्रोसेस कंडिशन्स आणि अंदाजित पुढे होणाऱ्या प्रोसेस कंडिशन्सवर कार्य करते. PD-कंट्रोलमध्ये, कंट्रोल आउटपुट हे एरर सिग्नल आणि त्याचे डेरिव्हेटिव्ह यांचे लिनिअर कॉम्बिनेशन आहे. PD-कंट्रोलमध्ये प्रपोर्शनल कंट्रोलमुळे होणारा चढउतार कमी करणे आणि डेरिव्हेटिव्ह कंट्रोलमुळे प्रोसेस एररचा अंदाज लावणे यांचा समावेश आहे.

या PD-कंट्रोलरचे गणितीय समीकरण खालीलप्रमाणे आहे:

$$P(t) = K_p e_p + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + P(0)$$

ही सिस्टीम प्रपोर्शनल कंट्रोल मुळे होणारा ऑफसेट दूर करत नाही, परंतु , लोड चेंज ऑफसेट एरर स्वीकार्य असल्यास वेगवान प्रोसेस लोड बदल हाताळते. Fig.4.16 मध्ये लोड चेंज झाल्यास PD कसा प्रतिसाद देतो हे दर्शविले आहे. येथे हे पाहिले जाऊ शकते की डेरिव्हेटिव्ह ॲक्शन कंट्रोलर आउटपुटला रेट ऑफ चेंज ऑफ एरर नुसार बदलते.

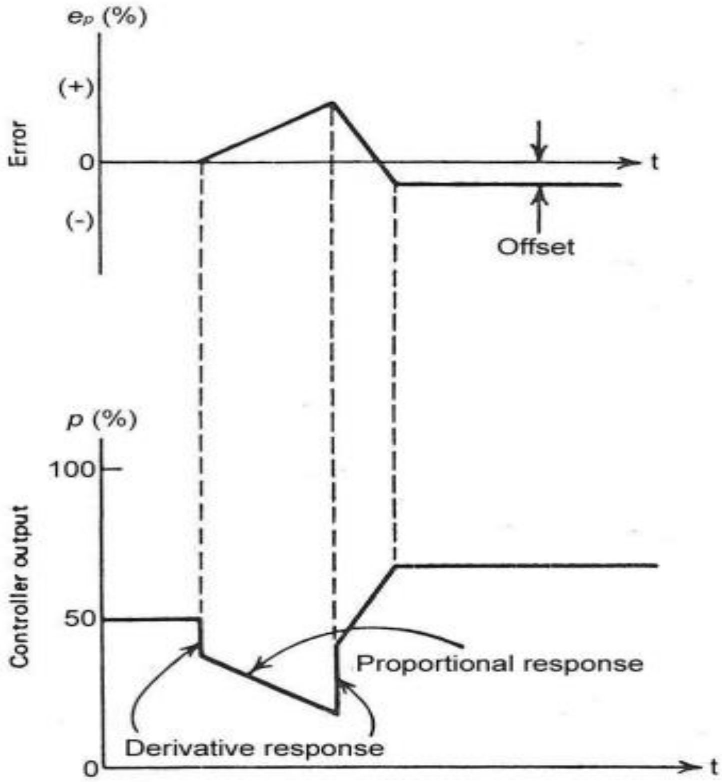


Fig. 4.16
PD कंट्रोल मोड रिस्पॉन्स शोइंग ऑफसेट एरर फॉर चेंजिंग लोड

4.5.3 प्रोपोर्शनल-इंटिग्रल-डेरिव्हेटिव्ह नियंत्रण मोड (PID मोड):

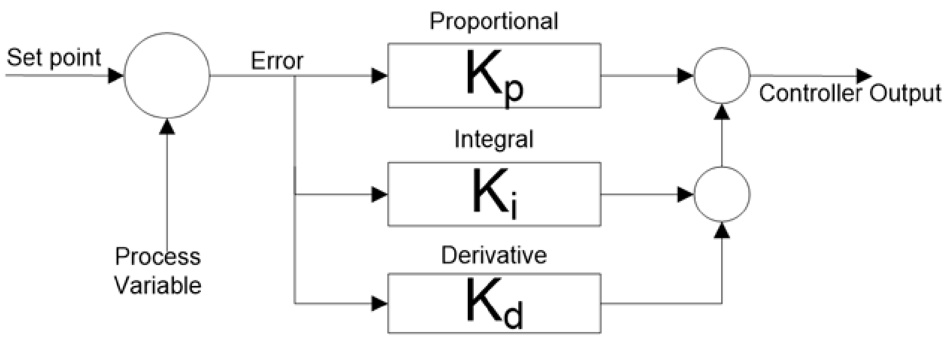


Fig. 4.16
ब्लॉक डायग्रॅम ऑफ PID कंट्रोलर

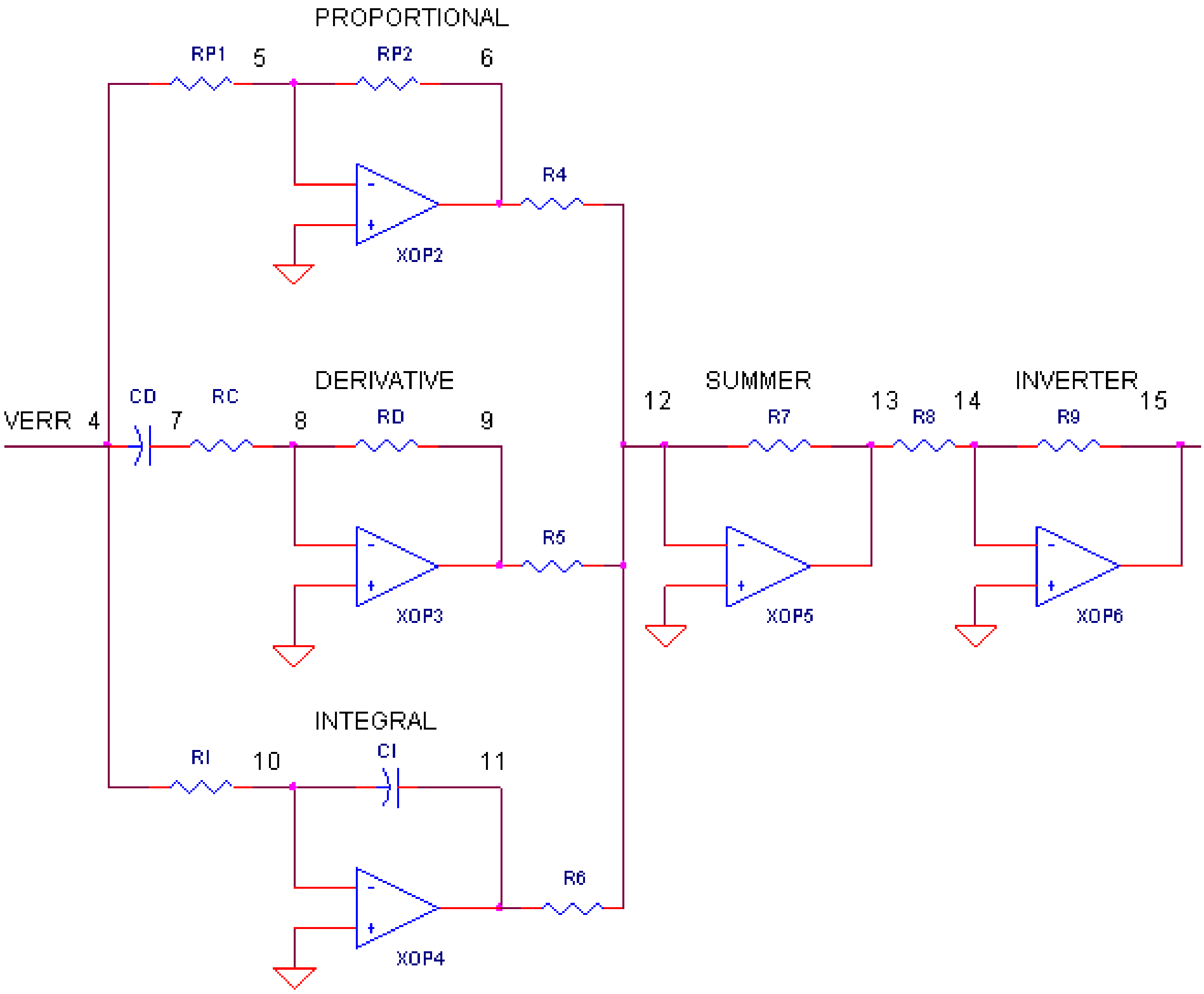


Fig. 4.17
ओप-अँप चा वापर करून PID कंट्रोलर

सर्वात शक्तिशाली परंतु कॉम्प्लेक्स कंट्रोलर मोड ऑपरेशन्सपैकी एक प्रोपोर्शनल, इंटिग्रल आणि डेरिव्हेटिव्ह मोड या तिघांना एकत्र करून बनतो. हा PID मोड कोणत्याही प्रोसेस एन्व्हायरॉन्मेंट वापरला जाऊ शकतो. त्याचे विश्लेषणात्मक समीकरण खालीलप्रमाणे आहे:

$$P(t) = K_p e_p + K_p K_I \int_0^t e_p \, dt + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + P_I(0)$$

हा मोड प्रोपोर्शनल मोडचे ऑफसेट दूर करतो आणि अचानक किंवा सतत बदलत्या लोडसाठी वेगवान रिस्पॉन्स प्रदान करतो. एक सामान्य PID रिस्पॉन्स Fig. 4.18 मध्ये दर्शविला आहे

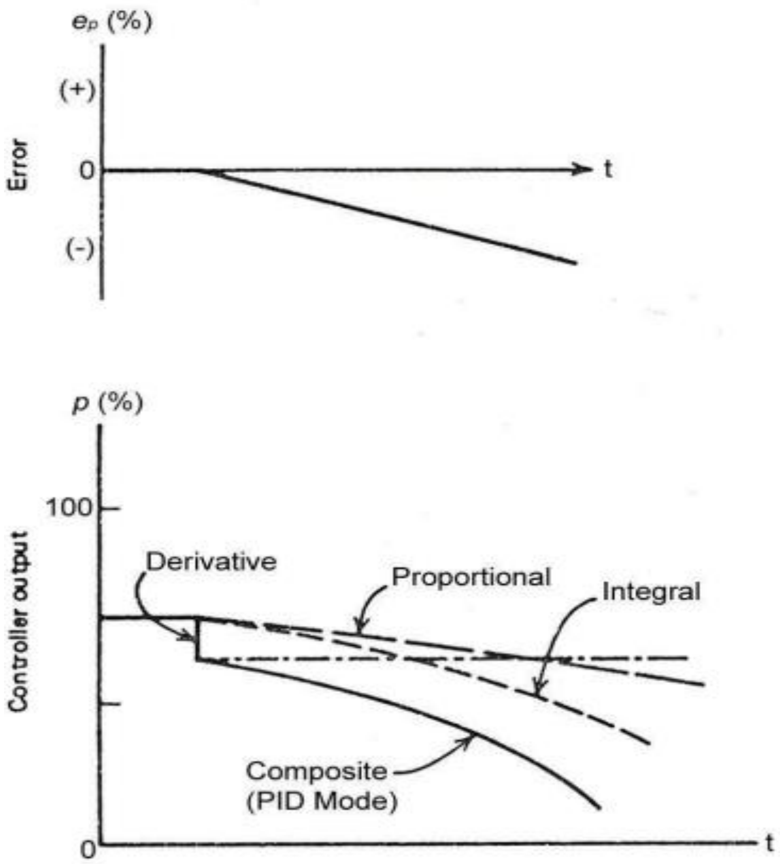


Fig. 4.18

PD कंट्रोल मोड रिस्पॉन्

Parameters	**PD controller**	**PI controller**	**PID controller**
Control action	Proportional + Derivative	Proportional + Integral	Proportional + Integral + Derivative
Mathematical Formula	$P(t) = K_p e_p + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + P(0)$	$P(t) = K_p e_p + K_p K_I \int_0^t e_p dt + P_I(0)$	$P(t) = K_p e_p + K_p K_I \int_0^t e_p dt + K_p K_D \frac{de_p}{dt} + P_I(0)$
Error Reduction	Cannot eliminate steady-state error	Eliminates steady-state error	Eliminates steady-state error
Response Speed	Faster response due to K_D	Slower response due to K_I	Balanced response
Steady-State Error	Present (not eliminated)	Eliminated	Eliminated
Stability	More stable compared to PI but can be oscillatory	Can introduce instability if K_I is too high	Most stable if tuned properly
Overshoot	High overshoot due to derivative action	Less overshoot than PD	Can be optimized to minimize overshoot
Best Use Case	Systems requiring fast response without steady-state error elimination	Systems needing zero steady-state error but can tolerate slower response	Systems requiring both fast response and zero steady-state error
Common Applications	Robotics, motor control, position control	Temperature control, level control	Aerospace, process control, complex systems

Quesions

1. State need of controller. [U]
2. Define a process control system [R]
3. Draw block diagram of Process Control System. State function of each block. [R/U]
4. Explain the role of the following components in a process control system:
   a) Sensor
   b) Controller
   c) Actuator [U]
5. Enlist different types of control actions used in process control systems. [R]
6. Give classification of control actions. [U]
7. Explain with neat sketch ON-OFF controller action. (Consider any suitable example). [A]
8. Define:i) Proportional band ii) Offset [R]
9. State significance of neutral zone. [U]
10. State mathematical output equations for Proportional (P) control action. [R]
11. State mathematical output equations for Integral (I) control action. [R]
12. State mathematical output equations for Derivative (D) control action. [R]
13. List two applications of each control mode: P, I, and D. [R]
14. The integral control action eliminates steady-state error in a control system. Justify. [U]
15. State mathematical output equations for PD control action. [R]
16. State mathematical output equations for PI control action. [R]
17. State mathematical output equations for PID control action. [R]
18. Compare the responses of PI, PD, and PID controllers in terms of mathematical equation, stability, overshoot and application. [A]
19. Describe PD control action. State its applications. (Any two). [R/U]
20. Draw electronic PID controller with op-amp. Describe its operation with output equation and response. [A]
21. Compare PD and PID controllers on the basic of:
    i. Control action
    ii. Mathematical formula
    iii. Stability
    iv. Applications [A]

Unit 5 Servo System and Components
सर्वो सिस्टिम आणि घटक

विषय निष्पत्ती (CO): औद्योगिक उपयोगात येणाऱ्या सर्वो सिस्टिम च्या कॉम्पोनंट ची देखभाल ठेवणे

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

TLO 1: सर्वो सिस्टीमचे फंक्शन आणि कंट्रोल सिस्टीममधील त्याचे महत्त्व स्पष्ट करा.

TLO 2: एरर डिटेक्टर' म्हणून डिफरेंशियल सर्वो घटकांच्या` कार्याचे वर्णन करा.

TLO 3: एसी सर्वो मोटर, डीसी सर्वो मोटर आणि स्टेपर मोटरमधील फरक सांगा.

TLO 4: एसी आणि डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टममधील फरक स्पष्ट करा.

5.1 सर्वो सिस्टिम: सर्वो सिस्टिम ही स्वयंचलित फीडबॅक नियंत्रण सिस्टिम आहे, जी मेकॅनिकल पोझिशन, व्हेलॉसिटी किंवा एक्सलरेशन या स्वरूपात आउटपुटसह एरर (error) सिग्नलवर कार्य करतात. एरर सिग्नल मोटर्स चालवण्यासाठी वाढवले जातात, जे आउटपुटला जोडलेले असतात.

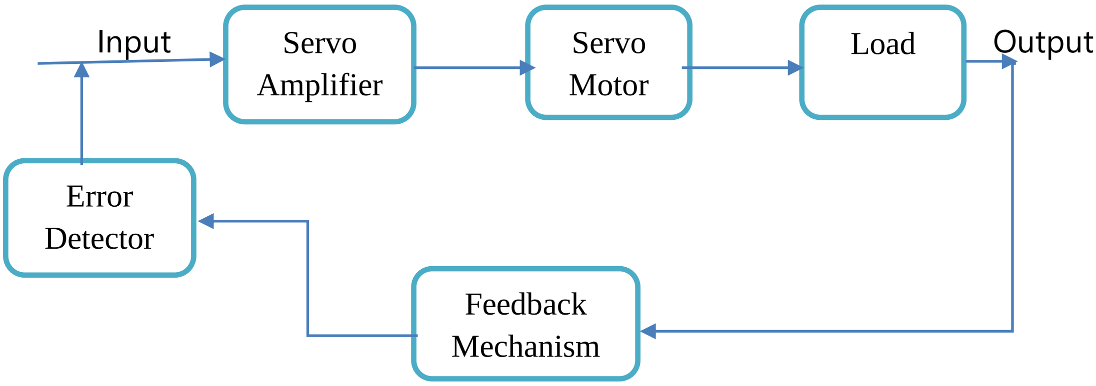


Fig 5.1
सर्वो सिस्टीमची ब्लॉक डायग्राम

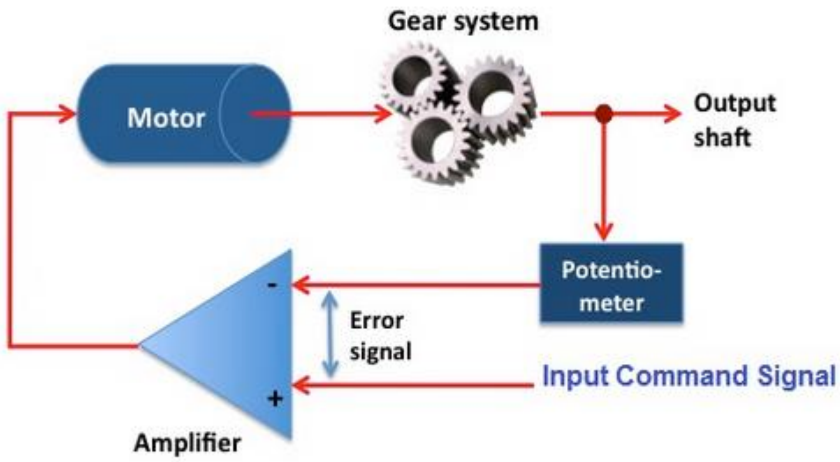


Fig 5.2
सर्व्होमेकॅनिझमचे चित्रण

(Courtesy: https://electricalbaba.com/basics-of-servomechanism-and-servo-motor/)

वर्किंग: फिगर 5.2 सर्वो सिस्टिमची सामान्य योजना दर्शवते. हे गियर सिस्टिमद्वारे मोटरद्वारे चालविलेले लोड शाफ्ट दर्शविते. एरर डिटेक्टर म्हणून पोटेंशियोमीटर परून शाफ्टची इच्छित पोझिशन मोजली जाते

आणि तुलना केली जाते. पोटेंशियोमीटर चे आउटपुट, हे एरर इनपुट म्हणून कार्य करते; जे ॲम्प्लीफायर वापरून वाढवले जाते. हे सिग्नल, गियर सिस्टिमद्वारे लोड चालविण्याकरिता; मोटरचे आर्मेचर व्होल्टेज नियंत्रित करण्यासाठी वापरले जाते. सर्वो सिस्टीम ही नियंत्रण सिस्टिमतील एक महत्त्वाचा भाग आहे कारण ती उच्च अचूकता, जलद प्रतिसाद वेळ, उच्च विश्वासार्हता (रिलायबिलिटी), कमी उर्जा वापर, उच्च टॉर्क, लवचिकता (फ्लेक्सिबिलिटी), सुलभ देखभाल प्रदान करते.

5.1.1 सर्वो सिस्टीम्सचे ॲप्लिकेशन्स

1. रोबोटिक्स: रोबोटिक्समध्ये सर्वो सिस्टीमचा वापर रोबोट आर्म्स आणि ग्रिपर्सची पोझिशन, स्पीड आणि टॉर्क नियंत्रित करण्यासाठी केला जातो.
2. CNC मशीन्स: CNC मशीनमध्ये सर्वो सिस्टीमचा वापर कटिंग टूल्सची पोझिशन आणि स्पीड नियंत्रित करण्यासाठी केला जातो.
3. कन्व्हेयर सिस्टम्स: कन्व्हेयर बेल्ट्सचा स्पीड आणि टॉर्क नियंत्रित करण्यासाठी कन्व्हेयर सिस्टिममध्ये सर्वो सिस्टिमचा वापर केला जातो.
4. एरोस्पेस: सर्वो सिस्टीमचा वापर एरोस्पेसमध्ये विमान आणि अंतराळ यान घटकांची पोझिशन, स्पीड आणि टॉर्क नियंत्रित करण्यासाठी केला जातो.

5.2 सर्वो सिस्टिमचे घटक (कंपोनंट)

1. नियंत्रक (कंट्रोलर): नियंत्रक हा सर्वो सिस्टिमचा ब्रेन आहे. हे वापरकर्त्याकडून किंवा उच्च-स्तरीय नियंत्रकाकडून इनपुट प्राप्त करते आणि ॲक्ट्युएटरला आउटपुट पाठवते. कंट्रोलर हा मायक्रोकंट्रोलर, पीएलसी (प्रोग्रामेबल लॉजिक कंट्रोलर) किंवा समर्पित (डेडिकेटेड) सर्वो कंट्रोलर IC असू शकतो.
2. फीडबॅक सेन्सर: फीडबॅक सेन्सर हा मेकॅनिकल सिस्टीमची पोझिशन, स्पीड किंवा टॉर्क मोजतो आणि ही माहिती कंट्रोलरला परत पाठवतो. फीडबॅक सेन्सर्सच्या सामान्य प्रकारांमध्ये पोटेंशियोमीटर, एन्कोडर आणि टॅकोमीटर यांचा समावेश होतो.
3. ॲक्ट्युएटर: ॲक्ट्युएटर हा घटक आहे जो कंट्रोलरकडून विद्युत सिग्नलला यांत्रिक गतीमध्ये रूपांतरित करतो. सामान्य प्रकारच्या ॲक्ट्युएटरमध्ये डीसी मोटर्स, स्टेपर मोटर्स आणि सर्वो मोटर्सचा समावेश होतो.

5.2.1 पोटेंशियोमीटर: पोटेंशियोमीटर हा एक प्रकारचा विद्युत घटक आहे जो मेकॅनिकल सिस्टीमची पोझिशन किंवा डिस्प्लेसमेंट मोजण्यासाठी वापरला जातो. हा एक व्हेरिएबल रेझिस्टर आहे जो शाफ्ट किंवा स्लाइडर सारख्या हलत्या भागाच्या पोझिशनतील बदलांचा रिस्पॉन्स त्याचे रेझिस्टन्स व्हॅल्यू बदलतो.

वर्किंग: पोटेंशियोमीटर एक व्हेरिएबल रेझिस्टर आहे जो मेकॅनिकल स्पीड इलेक्ट्रिकल सिग्नलमध्ये रूपांतरित करतो. हे सर्वो कंट्रोलरला पोझिशन फीडबॅक प्रदान करते. पोटेंशियोमीटरमध्ये एक मुव्हेबल संपर्क असतो, ज्याला वाइपर म्हणतात, जो रेझिस्टरच्या बाजूने सरकतो. जसे वाइपर हलतो, टर्मिनल्समधील रेझिस्टन्स बदलतो, परिणामी व्होल्टेज आउटपुट मध्ये बदल होतो. व्होल्टेज आउटपुट वाइपरच्या पोझिशनच्या प्रपोर्शन मध्ये असते. पोटेंशियोमीटर हा सर्वो मोटर सिस्टीममधील एक महत्त्वाचा घटक आहे, जो पोझिशन कंट्रोलसाठी फीडबॅक प्रदान करतो. पोटेंशियोमीटर हा एक व्हेरिएबल रेझिस्टर आहे ज्यामध्ये मॅन्डरेलवर रेझिस्टिव्ह घटक वाऊंड केलेले असतात आणि वायपर द्वारे स्लाइडिंग कॉन्टॅक्ट असतो. हे अप्लाईड व्होल्टेजचे दोन भागांमध्ये विभाजन करते, ज्यामुळे आउटपुट व्होल्टेजवर तंतोतंत नियंत्रण ठेवता येते. कॉन्टॅक्ट ची मोशन अँगुलर किंवा ट्रान्सलेशनल किंवा दोन्हीचे कॉम्बिनेशन असू शकते ज्याला हेलिपॉट म्हणतात.

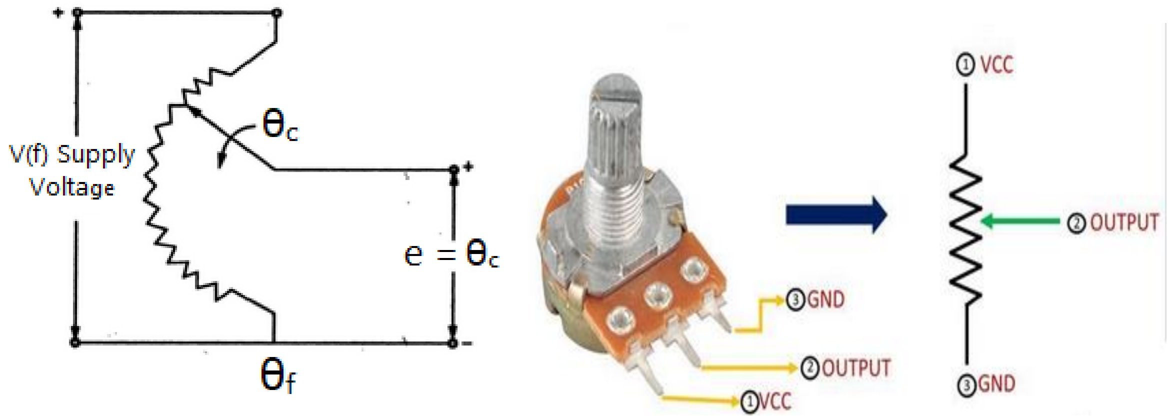


Fig 5.4

पोटेंशियोमीटरचे सिम्बॉलिक प्रेझेंटेशनआणि चित्रण

(Courtesy: Principles of Control Systems By Joseph Cyril Babu · 2006, https://www.pinterest.com/pin/pinout-of-a-potentiometer--802344489874975605/)

**5.2.2 पोटेंशियोमीटर ॲज ए `एरर डिटेक्टर':** पोटेंशियोमीटर सिस्टिमच्या इच्छित आणि वास्तविक पोझिशनमधील फरक मोजून, डेव्हिएशन सुधारण्यासाठी कंट्रोलरला एरर सिग्नल पाठवून `एरर डिटेक्टर' म्हणून कार्य करते. आकृती दर्शविते की पोटेंशियोमीटरची हाऊसिंग रेफेरेंन्सनुसार फिक्स केली आहे; रोटरी मोशनच्या बाबतीत, आऊटपुट व्होल्टेज e(t) हे शाफ्ट पोझिशन θc (t) च्या प्रपोर्शन मध्ये असते.

$$e(t) = Ks\ \theta c(t)$$

जिथे, K_s = प्रपोर्शनालिटी कॉन्स्टंट

$Ks = V / 2\pi N$

V = रेफरन्स होल्टेज मॅग्नीट्यूड,

N = नंबर ऑफ टर्नस किंवा सायकल्स ऑफ मोटर ऑर एन्कोडर्स

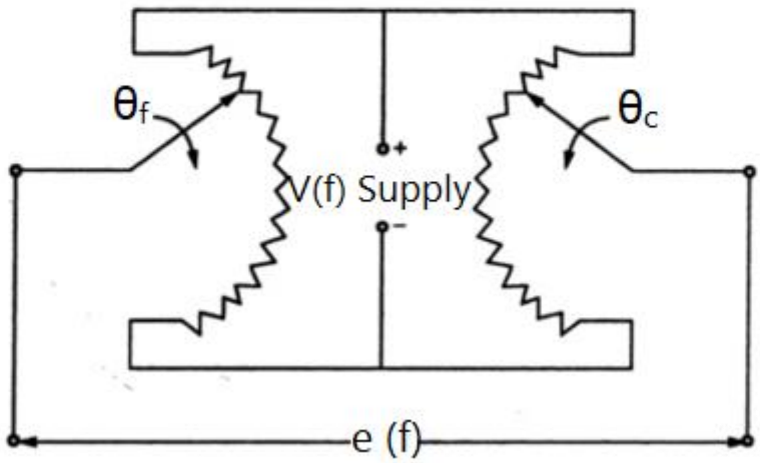


Fig 5.5:

पोटेंशियोमीटर ॲज ए `एरर डिटेक्ट

(Courtesy: Principles of Control Systems By Joseph Cyril Babu · 2006)

Fig. 5.5 एरर डिटेक्टर म्हणून पोटेंशियोमीटर दर्शवते. ज्यामध्ये समान मूल्याचे (व्हॅल्यू) दोन पोटेंशियोमीटर पॅरलल जोडलेले आहेत. DC सप्लाय चालू केला जातो आणि आउटपुट व्होल्टेज दोन पोटेंशियोमीटरच्या व्हेरिएबल टर्मिनल्समध्ये घेतले जाते. हे दोन रिमोटली स्थित शाफ्ट पोझिशन्सची तुलना करण्यास अनुमती देते.

आउटपुट असे दर्शविले जाते, $e(t) = K_s [\theta_R(t) - \theta_c(t)]$

पोझिशन सेन्सिंग, स्पीड सेन्सिंग, प्रेशर सेन्सिंग, टेम्परेचर सेन्सिंग, कंट्रोल व्हॉल्व्ह पोझिशनिंग, एरोस्पेस आणि डिफेन्स, इंडस्ट्रियल ऑटोमेशन (जॉयस्टिक्स, थ्रॉटल/गियर/व्हॉल्व्ह पोझिशन्स), मोशन कंट्रोल सिस्टम्स यासारख्या विविध ऍप्लिकेशन्ससाठी पोटेंशियोमीटरचा मोठ्या प्रमाणावर वापर केला जातो.

5.3 सिंक्रो: सिंक्रो हे असे उपकरण आहे जे शाफ्टच्या मेकॅनिकल रोटेशनला इलेक्ट्रिकल सिग्नलमध्ये रूपांतरित करण्यासाठी इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन वापरते. हे सामान्यतः अचूक पोझिशन, दिशा आणि गती मोजमाप आवश्यक असलेल्या ऍप्लिकेशन्स वापरले जाते. सिंक्रोचा वापर विमान आणि एरोस्पेस ऍप्लिकेशन्समध्ये सेन्सर्स आणि ट्रान्सड्यूसरपासून ऑटोपायलट सिस्टम्स, नेव्हिगेशन सिस्टम्स, फ्लाइट कंट्रोल सिस्टम्स, नेव्हिगेशन आणि मार्गदर्शन सिस्टिम आणि रडार आणि पाळत (सर्व्हिलिअन्स) ठेवणे सारख्या नियंत्रण प्रणालींमध्ये अँगुलर डिस्प्लेसमेंट माहिती प्रसारित करण्यासाठी केला जातो. सिंक्रो सिस्टिमचे प्रकार

1. एरर डिटेक्टर'किंवा कंट्रोल सिस्टिम
2. टॉर्क ट्रांसमिशन टाइप सिस्टिम

5.3.1 एरर डिटेक्टर' किंवा कंट्रोल सिस्टिम: सिंक्रो एरर किंवा कंट्रोल डिटेक्शन सिस्टिम ही एक प्रकारची सिस्टिम आहे जी फिरणाऱ्या शाफ्टच्या पोझिशन, दिशा किंवा गतीमधील एरर किंवा डेव्हिएशन शोधण्यासाठी सिंक्रोचा वापर करते. सिस्टिम शाफ्टच्या वास्तविक पोझिशनची किंवा गतीची इच्छित किंवा रेफरन्स व्हॅल्यू तुलना करते आणि दोन्हीमध्ये फरक असल्यास एरर सिग्नल जनरेट करते.

5.3.2 टॉर्क ट्रांसमिशन टाइप सिस्टिम: टॉर्क ट्रान्समिशन प्रकार सिस्टिम ही एक प्रकारची सिस्टिम आहे जी एका शाफ्टमधून दुसऱ्या शाफ्टमध्ये टॉर्क ट्रान्समीट करण्यासाठी सिंक्रो चा वापर करते. ही सिस्टिम सामान्यत: एरोस्पेस, ऑटोमोटिव्ह आणि औद्योगिक ऑटोमेशन सारख्या उच्च प्रमाणात अचूकता आणि विश्वासार्हता आवश्यक असलेल्या ऍप्लिकेशन्समध्ये वापरली जाते. या प्रणालींचा वापर पोझिशन नियंत्रण सिस्टिममध्ये एरर शोधक म्हणून केला जातो. टॉर्क ट्रान्समिशन टाइप सिस्टिमचे घटक खालीलप्रमाणे आहेत

1.सिंक्रो ट्रान्समीटर: इनपुट शाफ्टच्या मेकॅनिकल रोटेशनला इलेक्ट्रिकल सिग्नलमध्ये रूपांतरित करते.

2. सिंक्रो रिसीव्हर: सिंक्रो ट्रान्समीटरमधील इलेक्ट्रिकल सिग्नलला मेकॅनिकल रोटेशनमध्ये रूपांतरित करते.

3. टॉर्क ट्रान्समिशन युनिट: इनपुट शाफ्टमधून आउटपुट शाफ्टमध्ये टॉर्क प्रसारित करते.

4. आउटपुट शाफ्ट: शाफ्ट जो प्रसारित टॉर्क प्राप्त करतो.

सिंक्रो ट्रान्समीटर: सिंक्रो ट्रान्समीटरच्या कंस्ट्रक्शन मध्ये स्टेटर आणि रोटर असतात, ज्यामध्ये स्टेटर स्थिर भाग असतो आणि रोटर फिरणारा भाग असतो. स्टेटरला एक लॅमिनेटेड स्टीलचा कोर असतो आणि त्याच्याभोवती वायरची कॉइल गुंडाळलेली असते, तर रोटरला एक समान कोर असतो आणि त्याच्याभोवती वायरची कॉइल गुंडाळलेली असते. रोटर फिरत्या शाफ्टला जोडलेले आहे, आणि स्टेटर जागी फिक्स केले आहे. बेरिंग्स रोटरला सपोर्ट करतात आणि ते सहजतेने फिरू देतात. टर्मिनल बोर्ड सिंक्रो ट्रान्समीटरला एक्सटर्नल सर्किट्सशी जोडतो. त्यांचे कंस्ट्रक्शन थ्री-फेज अल्टरनेटरसारखेच आहे. आयर्न लॉस कमी करण्यासाठी सिंक्रोसचे स्टेटर स्टीलचे बनलेले आहे. 3-फेज वाइंडिंग साठी स्टेटर स्लॉट केलेले आहे. स्टेटर वाइंडिंगचा ऍक्सिस एकमेकांपासून 120° अंतरावर ठेवला जातो.

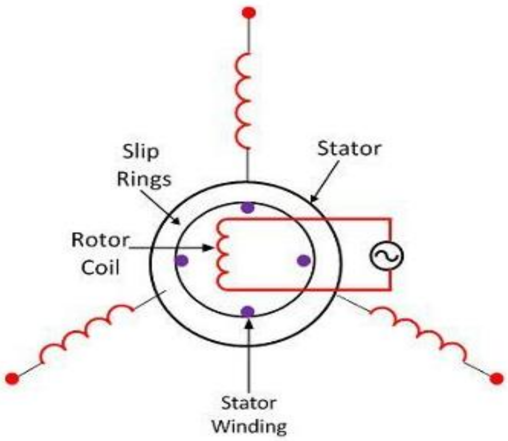


Fig. 5.6

सिंक्रो ट्रान्समीटर

वर्किंग: सिंक्रो ट्रान्समीटरच्या वर्किंगमध्ये मेकॅनिकल रोटेशनचे इलेक्ट्रिकल सिग्नलमध्ये रूपांतर होते. जेव्हा रोटर फिरतो तेव्हा ते इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनद्वारे स्टेटर कॉइलमध्ये व्होल्टेज प्रेरित करते. स्टेटर कॉइलमध्ये प्रेरित व्होल्टेज रोटरच्या रोटेशनच्या कोनाच्या प्रमाणात असते. इलेक्ट्रिकल सिग्नल नंतर पुढील प्रक्रियेसाठी सिंक्रो रिसीव्हर किंवा इतर डिव्हाइसवर प्रसारित केला जातो. सिंक्रो ट्रान्समीटर माहिती प्रसारित करण्यासाठी सिंगल-फेज किंवा थ्री-फेज इलेक्ट्रिकल सिग्नल वापरतो. आउटपुट सिग्नल हे शाफ्टची पोझिशन, दिशा आणि गती यांचे कार्य आहे. स्टेटर वाइंडिंगचे कॉइल्स तारेमध्ये जोडलेले आहेत. सिंक्रोसचा रोटर आकारात डंबेल आहे आणि त्यावर एक कॉन्सेंट्रिक कॉइल आहे. स्लिप रिंग्सच्या मदतीने रोटरला एसी व्होल्टेज दिले केले जाते. एसी व्होल्टेज ट्रान्समीटरच्या रोटरवर अप्लाय केले जाते आणि ते असे दर्शविले जाते,

$$V_r = \sqrt{2}\, V_r \sin \omega_c t$$

V_r – रोटर व्होव्होल्टेजची आरएमएस व्हॅल्यू

ω_c – कॅरियर फ्रिक्वेन्सी

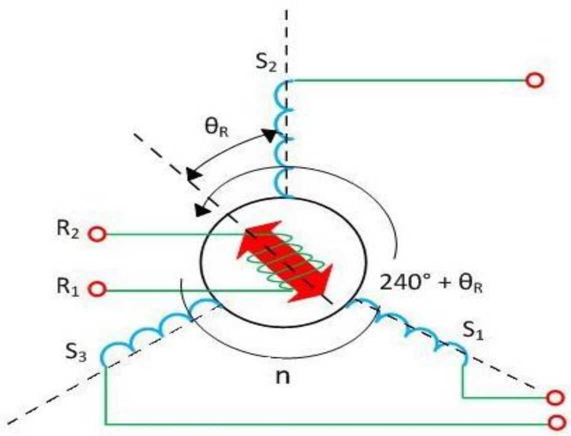


Fig 5.7

सिंक्रो ट्रान्समीटरचे वर्किंग

रोटरला लागू केलेले व्होल्टेज मॅग्नेटिक प्रवाह आणि त्याच्या ऍक्सिसवर एक पर्यायी प्रवाह प्रेरित करते. रोटर आणि स्टेटर फ्लक्समधील परस्पर इंडक्शनमुळे स्टेटर वाइंडिंगमध्ये व्होल्टेज प्रेरित होते. स्टेटर

वाइंडिंगमध्ये जोडलेला फ्लक्स रोटर आणि स्टेटरमधील अँगलच्या कोसाइनच्या बरोबरीचा असतो. स्टेटर वाइंडिंगमध्ये व्होल्टेज प्रेरित (इंड्यूस) केले जाते.

5.4 सिंक्रो ऍज ए `एरर डिटेक्टर': रोटरी शाफ्टच्या एक्चुअल आणि डिझायर पोझिशनमधील फरक मोजण्यासाठी सिंक्रोचा वापर एरर डिटेक्टर' म्हणून केला जाऊ शकतो. सिंक्रो ट्रान्समीटर सिंक्रो रिसीव्हरला सिग्नल पाठवतो, जो शाफ्टच्या एक्चुअल पोझिशनची डिझायर पोझिशनशी तुलना करतो. दोघांमध्ये फरक असल्यास, सिंक्रो रिसीव्हर एरर सिग्नल जनरेट करतो, ज्याचा वापर शाफ्टची पोझिशन करेक्ट करण्यासाठी केला जाऊ शकतो. शाफ्टची पोझिशन ऍडजस्ट करण्यासाठी आणि एरर दूर करण्यासाठी सर्वो मोटर किंवा इतर नियंत्रण उपकरण चालविण्यासाठी या एरर सिग्नलचा वापर केला जाऊ शकतो. सिंक्रोची उच्च अचूकता आणि रिझोल्यूशन हे एरर डिटेक्शन आणि करेक्शन एप्लीकेशन साठी उपयुक्त आहे.

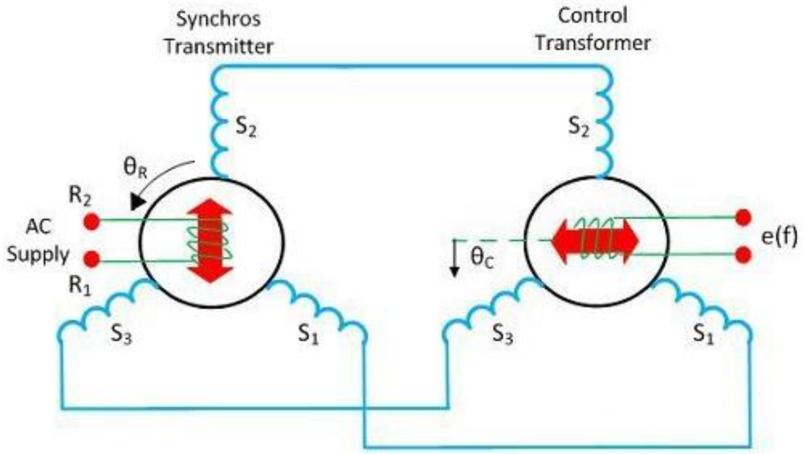


Fig 5.8
सिंक्रो ऍज ए `एरर डिटेक्टर'

कंस्ट्रक्शन: सिंक्रोच्या कंस्ट्रक्शनमध्ये सिंक्रो ट्रान्समीटर, सिंक्रो रिसीव्हर आणि डिफरेंशियल ऍम्प्लिफायर असतात. सिंक्रो ट्रान्समीटर आणि रिसीव्हर सामान्यत: एकसारखे असतात आणि ते सिंक्रोचे मुख्य घटक असतात. ते सहसा डिझाइनमध्ये एकसारखे असतात, प्रत्येकामध्ये रोटर आणि स्टेटर असतो. डिफरेन्शियल ऍम्प्लिफायर हा देखील सिंक्रो कंस्ट्रक्शनचा एक महत्त्वाचा भाग आहे. कंस्ट्रक्शनमध्ये हे तीन मुख्य घटक समाविष्ट आहेत, जे एक स्वयंपूर्ण युनिट तयार करण्यासाठी एकत्र केले जातात. सिंक्रो ट्रान्समीटर, रिसीव्हर आणि डिफरेंशियल ऍम्प्लिफायर हे सिंक्रोचे मूलभूत बिल्डिंग ब्लॉक्स आहेत आणि संपूर्ण सिस्टिम प्रदान करण्यासाठी एकत्रितपणे कार्य करण्यासाठी डिझाइन केलेले आहेत.

वर्किंग: सिंक्रो ट्रान्समीटर रिसीव्हरला सिग्नल पाठवतो, शाफ्टच्या एक्चुअल पोझिशन इंडिकेट करतो. रिसीव्हर याची तुलना रेफरेंस सिग्नलशी करतो व एरर सिग्नल निर्माण करतो. एरर सिग्नल कंट्रोल डिव्हाइसवर पाठविला जातो, जो शाफ्टची पोझिशन समायोजित करतो. रिसीव्हर शाफ्टची पोझिशन सतत मॉनिटर करतो, अचूक नियंत्रणासाठी परवानगी देतो. कंट्रोल ट्रान्सफॉर्मरशी कनेक्ट केल्यावर ट्रान्समीटर एरर डिटेक्टर म्हणून काम करतो. हे सेटअप अचूक पोझिशन नियंत्रण आणि सुधारणा सक्षम करते. व्होल्टेज असे दर्शविले जाते,

$$e(t) = k'V_r Cos\emptyset Sin\omega_c t$$

ϕ – ट्रान्समीटर आणि कंट्रोलरच्या रोटर ऍक्सिसमधील अँगुलर डिस्प्लेसमेंट.

Φ – 90° ॲक्सिस एकमेकांना परपेंडीकुलर असतो. सिंक्रो ट्रान्समीटर आणि कंट्रोल ट्रान्सफॉर्मर एकत्रितपणे त्रुटी शोधण्यासाठी वापरले जातात. वर दर्शविलेले व्होल्टेज समीकरण कंट्रोल ट्रान्सफॉर्मर आणि ट्रान्समीटरच्या रोटर्सच्या शाफ्टच्या पोझिशनइतके आहे.

5.5 रोटरी एन्कोडर्स: रोटरी एन्कोडर हा एक प्रकारचा सेन्सर आहे जो शाफ्टच्या रोटेशनल मोशनला डिजिटल सिग्नलमध्ये रूपांतरित करतो. रोटेटिंग शाफ्टची पोझिशन, गती आणि दिशा मोजण्यासाठी हे सामान्यतः रोबोटिक्स, सीएनसी मशीन आणि औद्योगिक ऑटोमेशन सारख्या ऍप्लिकेशन्स वापरले जाते. रोटरी एन्कोडरचे दोन मुख्य प्रकार आहेत: ॲब्सोल्यूट अँड इन्क्रिमेंटल. ॲब्सोल्यूट एन्कोडर शाफ्टच्या प्रत्येक स्थानासाठी एक युनिक डिजिटल कोड प्रदान करतात, तर इन्क्रिमेंटल एन्कोडर एक पल्स ट्रेन प्रदान करतात जे रोटेशनची डायरेक्शन आणि स्पीड दर्शवते.

रोटरी एन्कोडर्सचे प्रकार

1. ॲब्सोल्यूट रोटरी एन्कोडर्स
2. इन्क्रिमेंटल रोटरी एन्कोडर्स
3. ऑप्टिकल रोटरी एन्कोडर
4. मॅग्नेटिक रोटरी एन्कोडर्स
5. कॅपेसिटिव्ह रोटरी एन्कोडर्स
6. इन्डक्टिव्ह रोटरी एन्कोडर्स

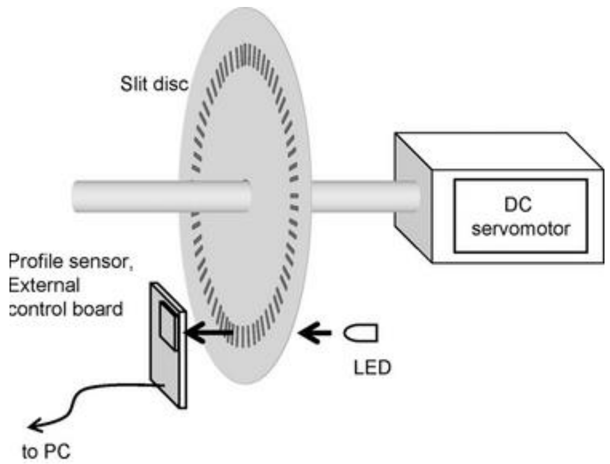


Fig. 5.9
रोटरी एन्कोडर्स

कंस्ट्रक्शन: रोटरी एन्कोडर्समध्ये सामान्यत: रोटर आणि स्टेटर असतो, रोटर फिरणाऱ्या शाफ्टला जोडलेला असतो आणि स्टेटर जागी फिक्स असतो. रोटरमध्ये मार्किंग्स किंवा स्लॉट्सची सिरीज असते जी शाफ्ट फिरते तेव्हा स्टेटरच्या जवळून जाते, शाफ्टच्या पोझिशनच्या प्रमाणात डिजिटल सिग्नल तयार करते.

वर्किंग: शाफ्ट फिरत असताना, शाफ्टला जोडलेला रोटर देखील फिरतो, ज्यामुळे रोटरवरील मार्किंग्स किंवा स्लॉट स्टेटरच्या जवळून जातात. स्टेटर मार्किंग्स किंवा स्लॉट्सचे पासिंग ओळखतो आणि डिजिटल सिग्नल तयार करतो, जो शाफ्टच्या पोझिशनच्या प्रमाणात असतो. त्यानंतर डिजिटल सिग्नल प्रोसेसिंग युनिटला पाठवला जातो, जसे की मायक्रोकंट्रोलर किंवा संगणक, जो सिग्नलचा अर्थ लावतो आणि शाफ्टची पोझिशन, डायरेक्शन आणि स्पीड ठरवतो. प्रोसेसिंग युनिट नंतर शाफ्टचा स्पीड नियंत्रित करण्यासाठी ही माहिती वापरू शकते, जसे की मोटरचा स्पीड किंवा डायरेक्शन ऍडजस्ट करून. शाफ्ट फिरत असताना

रोटरी एन्कोडर डिजिटल सिग्नल निर्माण करत राहतो, ज्यामुळे शाफ्टची पोझिशन आणि हालचाल यांचे सतत ऑब्सर्व्हेशन आणि कंट्रोल करता येते.

रोटरी एन्कोडरचे काही सामान्य ऍप्लिकेशन्स

1. मोटर कंट्रोल,
2. रोबोटिक्स
3. सीएनसी मशीन
4. औद्योगिक ऑटोमेशन.

5.6 सर्वो मोटर्स: सर्वो मोटर्स ही एक प्रकारची इलेक्ट्रिक मोटर आहे जी मेकॅनिकल सिस्टिमची पोझिशन, व्हेलॉसिटी आणि एक्सलरेशन यावर अचूक कंट्रोल प्रदान करण्यासाठी डिझाइन केलेली आहे. ते सामान्यतः रोबोटिक्स, CNC मशीन्स आणि औद्योगिक ऑटोमेशन सारख्या ऍप्लिकेशन्स, वापरले जातात, जेथे उच्च अचूकता आणि विश्वासार्हता आवश्यक असते. सर्वो मोटर्सचे कॉमन ऍप्लिकेशन्स,

1. रोबोटिक्स
2. सीएनसी मशीन
3. औद्योगिक ऑटोमेशन
4. गती नियंत्रण सिस्टिम
5. एरोस्पेस
6. ऑटोमोटिव्ह
7. वैद्यकीय उपकरणे

सर्वो मोटर्सचे प्रकार

1. DC सर्वो मोटर्स: या मोटर्स DC उर्जा स्त्रोत वापरतात आणि सामान्यतः रोबोटिक्स आणि CNC मशीन्स सारख्या अनुऍप्लिकेशन्स वापरल्या जातात.

2. AC सर्वो मोटर्स: या मोटर्स AC उर्जा स्त्रोत वापरतात आणि सामान्यतः औद्योगिक ऑटोमेशन आणि मोशन कंट्रोल सिस्टिम सारख्या अनुऍप्लिकेशन्स वापरल्या जातात.

3. ब्रशलेस सर्वो मोटर्स: या मोटर्स ब्रशलेस डिझाइन वापरतात आणि सामान्यतः रोबोटिक्स आणि एरोस्पेस सारख्या अनुऍप्लिकेशन्स वापरल्या जातात.

4. स्टेपर सर्वो मोटर्स: या मोटर्स स्टेपर मोटर डिझाइन वापरतात आणि सामान्यतः 3D प्रिंटिंग आणि CNC मशीन सारख्या ऍप्लिकेशन्समध्ये वापरल्या जातात.

5.6.1 AC सर्वो मोटर्स

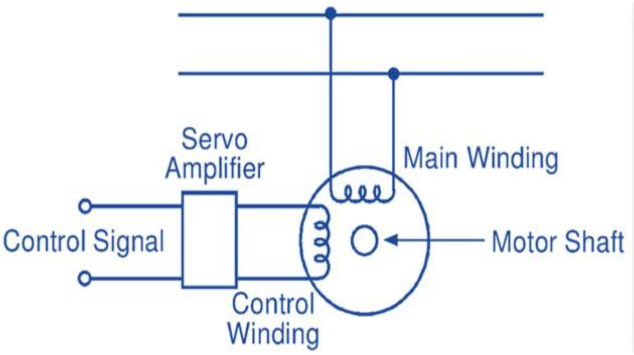


Fig 5.10

AC सर्वो मोटर्स

एसी सर्वो मोटर स्टेटर आणि रोटरमधील इंटरॅक्टिन्ग मॅग्नेटिक फील्ड प्रिंसिपल वर कार्य करते. स्टेटरचे फिरणारे मॅग्नेटिक फील्ड रोटरमध्ये व्होल्टेज आणते, ज्यामुळे ते फिरते. AC वीज पुरवठ्याची फ्रिक्वेन्सी आणि अँप्लिटयूड ऍडजस्ट करून मोटरचा स्पीड आणि पोझिशन नियंत्रित केली जाते. हे मोटरच्या हालचालीवर अचूक नियंत्रण ठेवण्यास अनुमती देते.

कंस्ट्रक्शन: एसी सर्वो मोटरच्या कंस्ट्रक्शनमध्ये सामान्यतः स्टेटर, जो फिक्स भाग असतो आणि रोटर असतो, जो फिरणारा भाग असतो. स्टेटर हा मॅग्नेटिक कोर, वायंडिंग आणि हाऊसिंगचा बनलेला असतो, तर रोटरमध्ये मॅग्नेटिक कोर, वाइंडिंग आणि शाफ्ट असतात. रोटरला बियरिंग्ज द्वारे सपोर्ट आहे, ज्यामुळे ते सहजतेने आणि कार्यक्षमतेने फिरू शकते. याव्यतिरिक्त, रोटरच्या पोझिशनवर आणि गतीबद्दल फीडबॅक देण्यासाठी एन्कोडर किंवा रिझोल्व्हरचा समावेश केला जातो, ज्यामुळे मोटरच्या हालचालीवर अचूक कंट्रोल मिळू शकते. संपूर्ण असेंब्ली एका संरक्षक केसिंग मध्ये ठेवली जाते, जी माउंटिंग पृष्ठभाग प्रदान करते आणि मोटरच्या अंतर्गत घटकांचे पर्यावरणीय घटकांपासून संरक्षण करते.

वर्किंग: सर्वो मोटर कंट्रोलरकडून सिग्नल प्राप्त करून कार्य करते, जी मोटरची डिझायर पोझिशन, व्हेलॉसिटी आणि एक्सलरेशन निर्धारित करते. मोटर नंतर डिझायर सेटपॉइंटशी जुळण्यासाठी तिची पोझिशन, व्हेलॉसिटी आणि एक्सलरेशन ऍडजस्ट करते. पोझिशन सेन्सर, जसे की एन्कोडर किंवा पोटेंशियोमीटर, कंट्रोलरला फीडबॅक प्रदान करतो, जे आवश्यकतेनुसार ऍडजस्ट करते. मोटर अचूक हालचाल करण्यासाठी आणि नियंत्रण राखण्यासाठी या फीडबॅकचा वापर करते. सर्वो मोटरची उच्च अचूकता आणि विश्वासार्हता हे अचूक नियंत्रण आवश्यक असलेल्या ऍप्लिकेशन आदर्श बनवते. मोटरची हालचाल स्मूथ आणि क्वायट आहे.

5.6.2 DC सर्वो मोटर्स: DC सर्वो मोटर्स हे इलेक्ट्रिक मोटरचे एक प्रकार आहेत जे DC उर्जा स्त्रोत वापरतात आणि मोटरची पोझिशन, व्हेलॉसिटी आणि एक्सलरेशन यावर अचूक नियंत्रण प्रदान करण्यासाठी डिझाइन केलेले आहेत. ते सामान्यतः रोबोटिक्स, सीएनसी मशीन आणि औद्योगिक ऑटोमेशन सारख्या ऍप्लिकेशनमध्ये वापरले जातात, जेथे उच्च ऍक्युरसी आणि विश्वासार्हता (रिलायबिलिटी) आवश्यक आहे

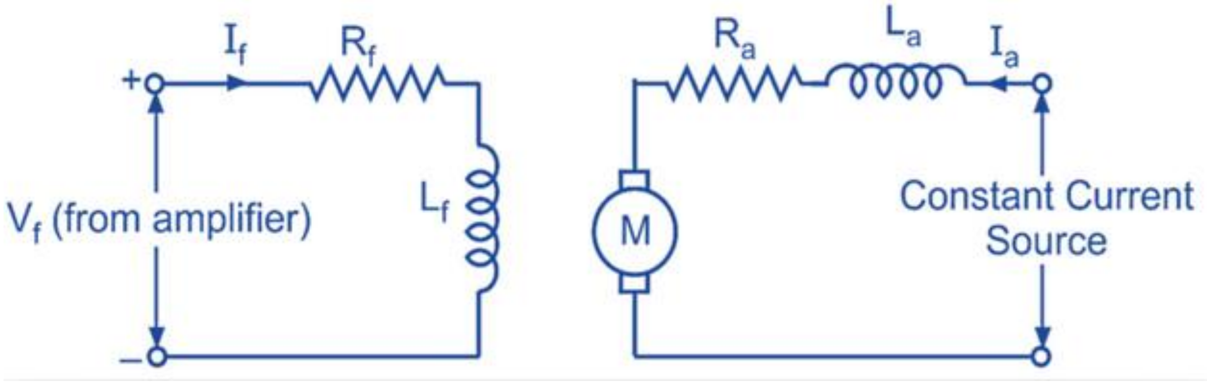


Fig. 5.11:
DC सर्वो मोटर्स

डीसी सर्वो मोटरचे प्रिंसिपल हे मॅग्नेटिक फील्ड आणि विद्युत प्रवाह वाहून नेणारी कॉइल यांच्यातील इंटरॅक्शन आधारित आहे. मोटरमध्ये स्टेटर आणि रोटर असतात, ज्यामध्ये स्टेटर स्थिर भाग असतो आणि रोटर फिरणारा भाग असतो. स्टेटरला डीसी पॉवर पुरवली जाते, जी मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण करते. रोटरला डीसी पॉवर देखील पुरवली जाते, ज्यामुळे स्टेटरच्या मॅग्नेटिक फील्डशी इंटरॅक्ट करणारा विद्युतप्रवाह निर्माण होतो, ज्यामुळे रोटर फिरतो.

5.7 स्टेपर मोटर: स्टेपर मोटर ही एक प्रकारची इलेक्ट्रिक मोटर आहे जी सतत स्मॉल, डिस्क्रिट स्टेपमध्ये फिरते. हे सामान्यतः 3D प्रिंटिंग, CNC मशीन आणि रोबोटिक्स सारख्या ऍप्लिकेशन्समध्ये वापरले जाते, जेथे मोटरच्या पोझिशन आणि व्हेलॉसिटीचे अचूक नियंत्रण आवश्यक असते. स्टेपर मोटर संपूर्ण रोटेशनला अनेक लहान स्टेपमध्ये विभागून कार्य करते, विशेषत: प्रति रेव्होल्यूशन 200 आणि 400 स्टेप दरम्यान. मोटार ड्रायव्हरद्वारे कंट्रोल केली जाते, जी मोटारला अनेक पल्स पाठवते, ज्यामुळे प्रत्येक पल्ससाठी ती एका फिक्स अँगलने, विशेषत: 0.5 ते 5 अंशांच्या दरम्यान फिरते.

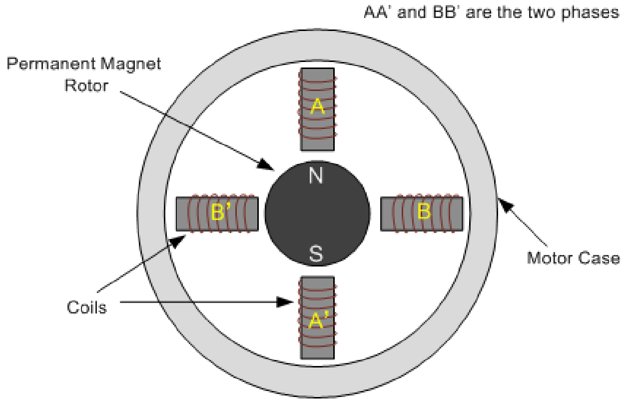
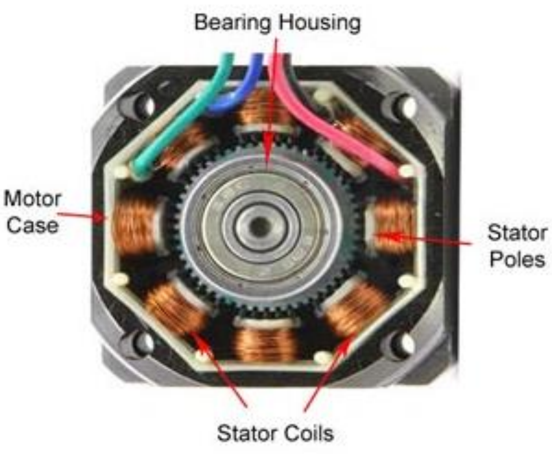


Fig 5.12
स्टेपर मोटर



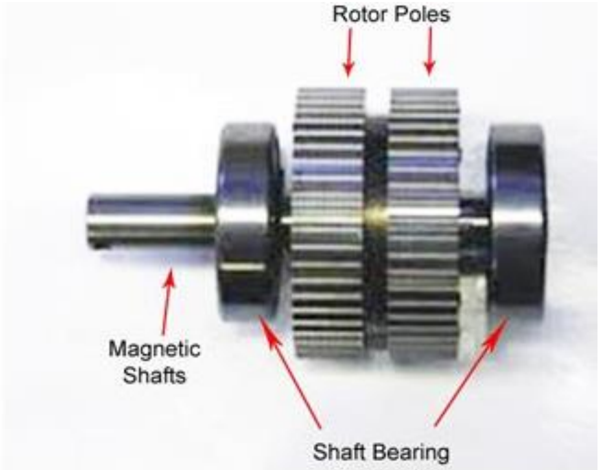


Fig 5.13
टिपिकल स्टेपर मोटरचे अंतर्गत चित्रण

(Courtesy: https://www.engineersgarage.com/stepper-motor-basics-types-and-working/)

वर्किंग: स्टेपर मोटर ड्राईव्हशाफ्ट कडून पल्स प्राप्त करून कार्य करते, ज्यामुळे मोटर एका निश्चित अँगलने फिरते. मोटरचा रोटर स्टेटरच्या मॅग्नेटिक क्षेत्राशी संरेखित करून नवीन पोझिशनत हलतो आणि नंतर ड्रायव्हर दुसरी पल्स पाठवतो, ज्यामुळे मोटर पुढील पोझिशनत फिरते. ही प्रक्रिया पुनरावृत्ती होते, मोटार लहान, डिस्क्रिट स्टेपमध्ये फिरते, ज्यामुळे मोटरच्या पोझिशनवर आणि गतीवर अचूक नियंत्रण ठेवता येते. मोटारची पोझिशन ड्राईव्हशाफ्टने पाठवलेल्या पल्सची संख्या आणि वारंवारता यांच्याद्वारे नियंत्रित केली जाते आणि ड्राईव्हने पाठवलेल्या डाळींच्या क्रमानुसार मोटर दोन्ही दिशेने फिरू शकते. पल्स पाठवल्याप्रमाणे, मोटर स्टेप बाय स्टेप रीतीने फिरते, प्रत्येक स्टेप रोटेशनच्या विशिष्ट अँगलशी

संबंधित असते. एकूणच, स्टेपर मोटरचे ऑपरेटिंग प्रिंसिपल मोटरच्या हालचालीवर अचूक आणि रिलायबल नियंत्रण ठेवण्यास अनुमती देते.

स्टेपर मोटर्सचे प्रकार आहेत,

1. युनिपोलर स्टेपर मोटर्स
2. बायपोलर स्टेपर मोटर्स
3. हायब्रिड स्टेपर मोटर्स

स्टेपर मोटर्सचे ऍप्लिकेशन,

1. 3D प्रिंटिंग
2. सीएनसी मशीन
3. रोबोटिक्स
4. वैद्यकीय उपकरणे
5. ऑटोमोटिव्ह सिस्टिम
6. औद्योगिक ऑटोमेशन

Table 5.1

एसी सर्वो, डीसी सर्वो आणि स्टेपर मोटर यांच्यातील तुलना

Parameter	एसी सर्वो मोटर	डीसी सर्वो मोटर	स्टेपर मोटर मोटर
पावर सोर्स	अल्टरनेटिंग करंट (AC)	डायरेक्ट करंट (DC)	डायरेक्ट करंट (DC)
स्पीड रेंज	वाईड स्पीड रेंज (up to 100,000 rpm)	लो स्पीड रेंज (up to 10,000 rpm)	लिमिटेड स्पीड रेंज (up to 3,000 rpm)
टॉर्क	हाय टॉर्क ऍट लो स्पीड्स	हाय टॉर्क ऍट हाय स्पीड	लो टॉर्क ऍट हाय स्पीड
एफिशियन्सी	हाय एफिशियन्सी (up to 95%)	मिडीयम एफिशियन्सी (up to 80%)	लो एफिशियन्सी (up to 50%)
कंट्रोल	कॉम्प्लेक्स कंट्रोल सिस्टीम	सिम्पल कंट्रोल सिस्टीम	सिम्पल कंट्रोल सिस्टीम
कॉस्ट	हाय कॉस्ट	लो कॉस्ट	लो कॉस्ट
मेंटेनन्स	लो	हाय	लो
नॉईज	लो	हाय	मिडीयम
व्हायब्रेशन	लो	हाय	मिडीयम
पोझिशनिंग ॲक्युरसी	हाय पोझिशनिंग ॲक्युरसी (±1°)	मिडीयम पोझिशनिंग ॲक्युरसी (±5°)	हाय पोझिशनिंग ॲक्युरसी (±0.1°)
रिपीटॅबिलिटी	हाय रिपीटॅबिलिटी (±0.1°)	मिडीयम रिपीटॅबिलिटी (±1°)	हाय रिपीटॅबिलिटी (±0.1°)
रिस्पॉन्स टाईम	फास्ट रिस्पॉन्स टाईम (1-10 ms)	मिडीयम रिस्पॉन्स टाईम (10-100 ms)	स्लो रिस्पॉन्स टाईम (100-1000 ms)

5.8 पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम: पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम ही एक प्रकारची कंट्रोल सिस्टिम आहे जी मेकॅनिकल सिस्टीमची पोझिशन, जसे की मोटर किंवा रोबोट, इच्छित ठिकाणी कंट्रोल करते. सिस्टीमची वर्तमान पोझिशन निर्धारित करण्यासाठी सिस्टिम सेन्सर्सकडून फीडबॅक वापरते, जसे की एन्कोडर किंवा पोटेंटिओमीटर. सिस्टीम नंतर मोटर किंवा ऍक्च्युएटरमध्ये इनपुट ऍडजस्ट करून सिस्टिमला इच्छित

पोझिशनमध्ये हलवते. पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम चे उद्दिष्ट हे सिस्टीमच्या पोझिशनवर प्रिसाइज अँड ऍक्युरेट कंट्रोल मिळवणे आहे, हाय स्पीड आणि कमी एरर सह पोझिशन कंट्रोल सिस्टिमचे काही ऍप्लिकेशन्स आहेत,

1. रोबोटिक्स
2. सीएनसी मशीन्स
3. सर्वो मोटर्स
4. एरोस्पेस
5. ऑटोमोटिव्ह
6. वैद्यकीय उपकरणे
7. औद्योगिक ऑटोमेशन
8. 3D प्रिंटिंग
9. मशीन टूल्स
10. मेकॅट्रॉनिक्स उपकरणे

पोझिशन सिस्टिमचे प्रकार,

1. AC पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम
2. DC पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम

5.8.1 AC पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम: पोझिशन कंट्रोल सिस्टीम मेकॅनिकल सिस्टीमची पोझिशन, जसे की मोटर, गियर किंवा लिंकेज, इच्छित स्थानावर अचूकपणे नियंत्रित करण्यासाठी डिझाइन केलेली आहे. या सिस्टिम कंपोनंटच्या पोझिशनचे परीक्षण करण्यासाठी आणि इच्छित पोझिशनशी तुलना करण्यासाठी सेन्सर आणि एन्कोडर सारख्या अभिप्राय यंत्रणेचा वापर करतात. सिस्टिम नंतर एक्स्टर्नल डिस्टर्बन्स किंवा सिस्टीममधील बदलांना न जुमानता इच्छित पोझिशन राखण्यासाठी मोटर किंवा ॲक्ट्युएटरमध्ये इनपुट ऍडजस्ट करते. हे कंपोनंटच्या पोझिशनवर अचूक आणि अचूक नियंत्रण ठेवण्यास अनुमती देते, जे रोबोटिक्स, सीएनसी मशीनिंग आणि प्रिसिजन इंजीनियरिंग अशा अनेक एप्लीकेशन्समध्ये महत्त्वपूर्ण आहे.

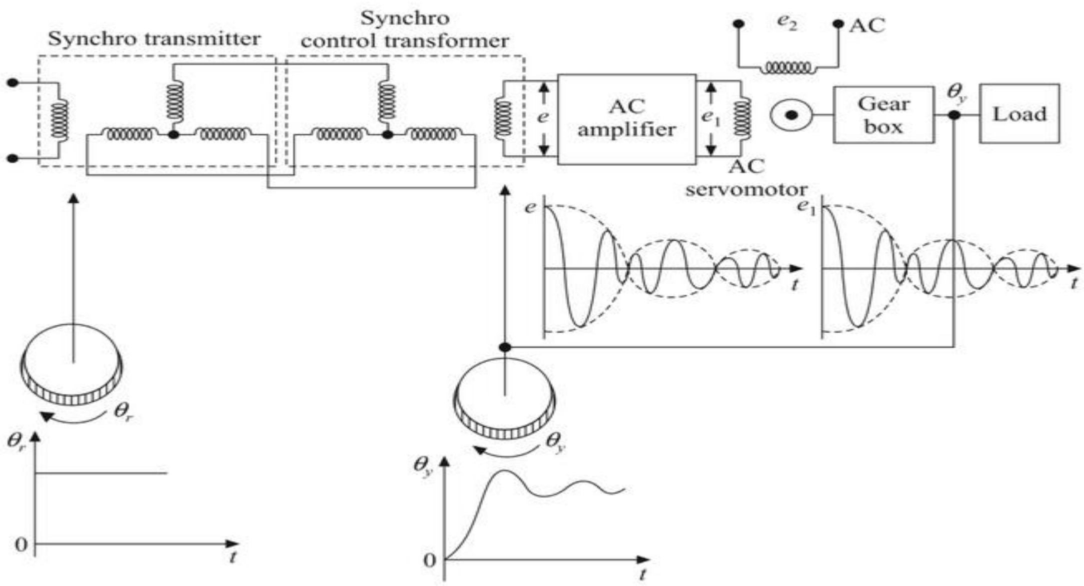


Fig 5.14
AC पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम
(Courtesy: Control Systems, By A. Anand Kumar · 2014)

रेफरन्स पोझिशनत (सिंक्रो ट्रान्समीटर रोटरची पोझिशन) बदलाशी संबंधित, कंट्रोल ट्रान्सफॉर्मर रोटरवर ॲम्प्लिट्यूड 'e' सह त्रुटी व्होल्टेज तयार होते. एसी सर्व्होमोटरद्वारे तयार होणारा टॉर्क हा कंट्रोल वाइंडिंग व्होल्टेजच्या थेट प्रमाणात (डायरेक्ट प्रपोर्शन) असतो. त्यामुळे सर्वोमोटरचा रोटर रेफरन्स पोझिशनकडे जाऊ लागतो.

5.8.2 DC पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम: डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम ही एक प्रकारची कंट्रोल सिस्टिम आहे जी मेकॅनिकल कंपोनंटची पोझिशन ॲक्युरेटली नियंत्रित करण्यासाठी डीसी मोटर वापरते. सिस्टिममध्ये सामान्यत: DC मोटर, एन्कोडर किंवा पोटेन्शिओमीटर सारखा पोझिशन सेन्सर, मायक्रोकंट्रोलर किंवा डेडिकेटेड IC सारखा कंट्रोलर आणि फीडबॅक लूप यांचा समावेश होतो. सिस्टिम इच्छित पोझिशनला सेट करून, पोझिशन सेन्सर वापरून वर्तमान पोझिशनचे मोजमाप करून, इच्छित पोझिशनशी वर्तमान पोझिशनची तुलना करून आणि घटकाला इच्छित पोझिशनला हलविण्यासाठी डीसी मोटरचा स्पीड आणि डायरेक्शन ॲडजस्ट करून कार्य करते. सिस्टिम सतत पोझिशनचे निरीक्षण करते आणि इच्छित पोझिशन राखण्यासाठी आवश्यकतेनुसार ॲडजस्टमेंट करते, उच्च अचूकता, अचूकता आणि विश्वासार्हता ऑफर करते. डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टीम सामान्यतः रोबोटिक्स, सीएनसी मशीन्स, अचूक अभियांत्रिकी, वैद्यकीय उपकरणे आणि ऑटोमोटिव्ह सिस्टीम यांसारख्या एप्लीकेशन्समध्ये वापरल्या जातात, जेथे पोझिशनवर अचूक कंट्रोल आवश्यक आहे.

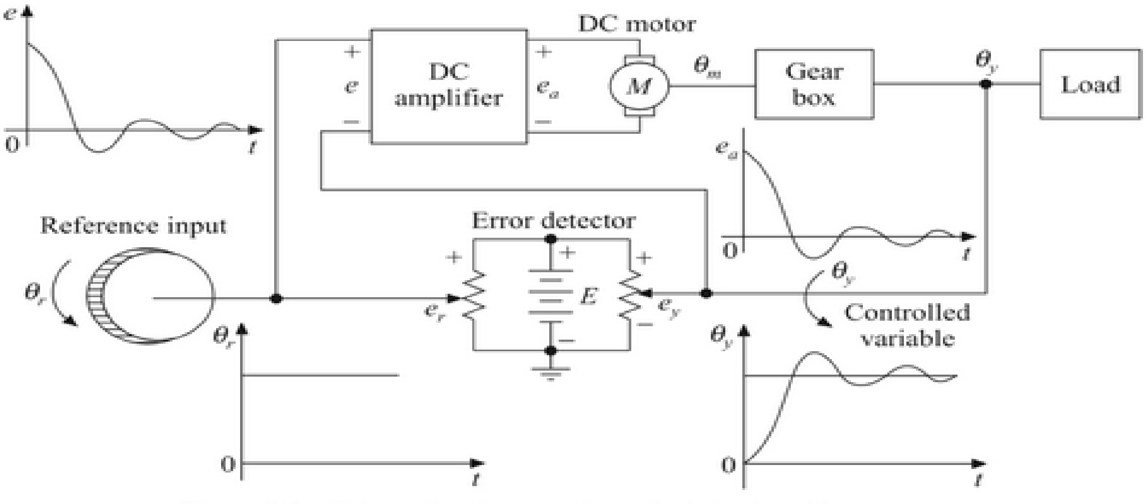


Fig 5.15

ब्लॉक डायग्राम ऑफ डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टीम

वर्किंग: डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टिम मेकॅनिकल कंपोनंटला इच्छित पोझिशनमध्ये हलविण्यासाठी डीसी मोटर वापरून कार्य करते. घटकाची वर्तमान पोझिशन मोजण्यासाठी सिस्टिम पोझिशन सेन्सर वापरते आणि इच्छित पोझिशनशी त्याची तुलना करते. कंट्रोलर नंतर घटकाला इच्छित पोझिशनमध्ये हलविण्यासाठी डीसी मोटरचा स्पीड आणि डायरेक्शन ॲडजस्ट करतो. सिस्टिम सतत पोझिशनचे निरीक्षण करते आणि इच्छित पोझिशन राखण्यासाठी आवश्यकतेनुसार ॲडजस्टमेंट करते. डीसी मोटरचा स्पीड आणि डायरेक्शन मोटरला पुरवलेला व्होल्टेज आणि करंट ॲडजस्टमेंट करून नियंत्रित केली जाते, ज्यामुळे घटकाच्या पोझिशनवर अचूक नियंत्रण ठेवता येते.

Table 5.2

एसी आणि डीसी पोझिशन कंट्रोल सिस्टिमची तुलना

पॅरामीटर	AC पोझिशन कंट्रोल सिस्टीम	DC पोझिशन कंट्रोल सिस्टीम
पावर सोर्स	अल्टरनेटिंग करंट (AC)	डायरेक्ट करंट (DC)
मोटर टाईप	एसी सर्वो मोटर	डीसी सर्वो मोटर
कंट्रोल मेथड	व्हेक्टर कंट्रोल फिल्ड ओरिएंटेड कंट्रोल	PWM (पल्स विथ मॉड्युलेशन) कंट्रोल, करंट कंट्रोल
पोझिशनिंग ऍक्युरसी	हाय ऍक्युरसी (±1°)	मिडीयम ऍक्युरसी (±5°)
रीपिटॅबिलिटी	हाय रीपिटॅबिलिटी (±0.1°)	मिडीयम रीपिटॅबिलिटी (±1°)
स्पीड रेंज	वाईड स्पीड रेंज (up to 100,000 rpm)	लिमिटेड स्पीड रेंज (up to 10,000 rpm)
टॉर्क	हाय टॉर्क ऍट लो स्पीड्स	हाय टॉर्क ऍट हाय स्पीड
इफिशिएन्सी	हाय इफिशिएन्सी (up to 95%)	मिडीयम इफिशिएन्सी (up to 80%)
कॉम्प्लेक्सिटी	कॉम्प्लेक्स कंट्रोल सिस्टीम	सिम्पल कंट्रोल सिस्टीम
कॉस्ट	हाय	लो
मेन्टेनन्स	लो	हाय
नॉईज	लो	हाय
व्हायब्रेशन	लो	हाय

Questions

1. State function of the servo system. (R)
2. Enlist the importance of the servo system. (R)
3. Draw a neat block diagram of the Servo system. (R)
4. Enlist components of the servo system and state their functions. (R)
5. Explain the construction and working of the potentiometer. (U)
6. Sketch a potentiometer as an error detector. State the applications of potentiometers in the control system. (U)
7. Explain synchro as an error detector. (U)
8. Define synchro. Give its two applications. (R)
9. Draw a neat sketch of a synchro transmitter. Explain it's working. (U)
10. Suggest the type of equipment in an aircraft for controlling navigation system. Justify your answer (A)
11. Compare AC Servo motors and DC Servo motors based on given parameters power source, maintenance, vibration, noise.
12. State the principle of AC servo motor. Draw its schematic diagram.
13. Enlist applications of stepper motors. (R)
14. Enlist applications of servo motors. (R)
15. Draw a schematic of AC Servo motor. (U)
16. Draw a schematic of DC Servo motor. (U)

17. State the principle of DC servo motors with a neat diagram. (R)
18. Justify the use of stepper motors in elevators and escalators (A)
19. A Robotic system is used in pick and drop of delicate boxes. Suggest the type of motor used for the application in robotic system and justify your answer. (A)
20. An escalator generally lifts a load of 2 tons up to the height of 300 feet. Suggest the type of motor that can be used for the said application and justify your answer (A)
21. Draw a neat diagram of AC position control system. (U)
22. Draw a neat diagram of DC position control system. (U)

Bibliography:

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	I. J. Nagrath & M. Gopal	Control System Engineering	New Age International Publishers, 2021, ISBN: 978-8195175581
2	K. Ogata	Modern Control Engineering	PHI, New Delhi (5th Edition), 2008,ISBN: 978-8131703118
3	C. D. Johnson	Process Control Instrumentation Technology	PHI Learning, 2015, ISBN: 978-9332549456
4	A. Anand Kumar	Control Systems	PHI (2nd Edition), 2014, ISBN: 978-8120349391
5	K.P. Ramchandran	Control Engineering	Willey India, Delhi, 2011, ISBN: 978-8126522880,
6	Rajeev Gupta	Control System Engineering	NISE's, Willey India, 2018 ISBN: 8126571837
7	S.P. Eugene Xavier, Joseph Cyril Babu, J.	Principles of Control System	S. Chand, New Delhi, 2004, ISBN: 978-8121917780