بسم الله الرحمن الرحیم

الحمد لله رب العالمین و صلی الله علی سیدنا نبینا محمد و آله الطاهرین

کنترلگرهاي PID

نظريه ، طراحي وتنظيم

مترجمان :
عليرضا خليلي تهراني
حسين شيرازي

سرشناسه : استروم، کارل يوهان ، ۱۹۳۴ ـ م. Astrom,Karl Johan
عنوان و پديدآور: کنترلگرهاي PID { پي . آي . دي } : نظريه طراحي و تنظيم / { مولفين کارلبوهـان اسـتروم؛ نوره هگ لوند}؛ مترجمان عليرضا خليلي تهراني .: حسين شيرازي
مشخصات نشر : تهران دانشگاه صنعتي مالك اشتر ، ۱۳۸۵ .
مشخصات ظاهري : ۵۹۰ ص . : مصور ، حدول ، نمودار .
فروست : (دانشگاه صنعتي مالك اشتر ؛ ۷۹)
شابك : ۷۰۰۰۰ ريال ۲- ۴۸- ۸۴۵۲ – ۹۶۴ ياداشت : فيپا ياداشت : نمايه
يادداشت : کتابنامه : ص .{ ۵۵۹ } ـ ۵۷۲ . ياداشت : PID Controllerd .2 nd ed . c1995 .
شناسه افزوده : هگ لوند، توره Hagglund / Tore
شناسه افزوده خليلي تهراني ، عليرضا ، ۱۳۵۱ ـ ، مترجم
شيناسه افزوده : شيرازي ، حسين ، ۱۳۳۹ ـ ، مترجم شناسه افزوده : دانشگاه صنعتي مالك اشتر
رده بندي کنگره : ۱۳۸۵ ۵ الف ۹۳ ك / ۲۲۳ TJ
رده بندي ديويي : ۸/ ۶۲۹ شماره کتابخانه ملي : ۲۰۲۵۸ – ۸۵ م

دانشگاه صنعتي مالك اشتر

« مجتمع دانشگاهي فناوري اطلاعات ، ارتباطات و امنيت »

انتشارات دانشگاه صنعتي مالك اشتر

عنوان کتاب :.........کنترلگرهاي **PID** ، نظريه ، طراحي و تنظيم
مترجمان : ....عليرضا خليلي تهراني ـ حسين شيرازي
ناشر : .... انتشارات دانشگاه صنعتي مالك اشتر
طرح روي جلد : .... فريناز عسگري
ليتوگرافي ، چاپ و صحافي :......... انتشارات دانشگاه صنعتي مالك اشتر
شمارگان :......... ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ :......... اول زمستان۱۳۸۵
قيمت : ....۷۰۰۰ تومان

شابك۲-۴۸-۸٤۵۲-۹٦٤	ISBN: 964-8452- 48- 2

آدرس: تهران، لويزان، دانشگاه صنعتي مالك اشتر، مرکز آموزشي، پژوهشي اطلاع‌رساني،
مديريت انتشارات و مستندسازي. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

فهرست

پیشگفتار مؤلفین

در سال ۱۹۸۸ ما کتاب *تنظیم خودکار کنترلگرهاي PID*[1] را که در آن تجربیات به دست آمده در ایجاد تنظیم‌کنندة خودکار براي یك کنترلگرPID خلاصه شده بـود، چاپ کردیم. کتاب حاضر را مي‌توان به عنوان ادامة آن کتاب در نظر گرفت، هـر چنـد به طور قابل ملاحظه‌اي توسعه یافته است. از سال ۱۹۸۸ به دلیل سر و کار داشـتنمان با تحقیق در زمینة کنترلگرهاي PID و توسعة صنعتي این کنترلگرها مطالب بیشتري دربارة آنها آموختیم. به همین دلیل به شدت معتقدیم که مسئلة PID بـه طـور قابـل ملاحظه‌اي قابل اصلاح است و این کار کمك زیادي به کیفیت صنعتي آن خواهد کرد. این ایده تا حد زیادي توسط نشریات پیشرفتة صنعتي اخیر که در بخش مراجع فـصل اول آمده است، تقویت شده است.

دلیل اصلي نوشتن این کتاب، کمك به درك بهتر از کنترلگرPID است. علّت دیگر، آن است که اطلاعات در مورد کنترلPID در منابع کنترل پراکنده شده اسـت. کنترلگـر PID در طي دهه‌هاي گذشته توجه زیادي را از سوي جامعة تحقیقـات بـه خـود جلـب نکرده و اغلب در کتاب‌هاي درسي استاندارد کنترل به انـدازة کـافي پوشـش داده نـشده است. تدریس کنترل PID در دروس مقدماتي کنترل پسخور دانشگاه‌ها مهم اسـت و مـا امیدواریم که این کتاب بتواند زمینه‌اي مفید براي چنین دروسي ارائه دهد.

1. Automatic Tuning of PID Controllers

فرض مي‌شود كه خواننده داراي يك زمينة كنترلي است. خواننده بايد با مفـاهيمي مانند توابع تبديل، قطب‌هـا و صـفرها آشـنا باشـد. بنـابراين توضـيحات در ايـن مـوارد، مقدماتي خواهند بود. گاهي اوقات، در مـواردي كـه ارائـة جزئيـات حقـايقي را ضـروري نمي‌دانستيم، آنها را بدون توضيحات دقيق ارائه كرده‌ايم تا بتوانيم بجاي مطالب نظري به جنبه‌هاي عملي آنها بيشتر بپردازيم. به خواننده‌اي كه احساس مي‌كند نياز به زمينه‌هاي خاصّي در كنترل صنعتي دارد به شدت توصيه مي‌كنـيم كـه بـه يـك كتـاب در زمينـة كنترل صنعتي مانند زيبرگ[1] و همكاران (۱۹۸۹) مراجعه نمايد.

در مقايسه با كتاب قبلي، مطالب را به طور اساسي توسعه داده‌ايم. حجـم مطالـب فصل‌هاي مدلسازي، كنترلPID و طراحـی كنترلگرهـایPID بـيش از دو برابـر شـده است. فصل تنظيم خودكار به منظور ارائة توسعة پويايي كه اين مبحـث در سـال‌هـاي اخير داشته است، به طور كامل بازنويسي شده اسـت. دو فـصل جديـد در ايـن زمينـه اضافه شده‌اند. يك فصل، روش‌هاي تنظيم جديد را توضيح مي‌دهد. ايـن مطلـب قـبلاً چاپ نشده است. يك فصل جديد در الگوهاي كنترلي كـه چگـونگي بـه دسـت آوردن سيستم‌هاي پيچيده را توسط تركيب كنترلگرهايPID با ساير عناصر توضيح مي‌دهد، ارائه شده است. ما مايليم از اشخاص متعددي كه ما را حمايت و ياري كردنـد تـشكر و قدرداني كنـيم. منبـع اصـلي مـا در كنتـرلPID توسـط اكـسل وسـترنيوز[2] و مايـك سامروايل[3] از ايروترم[4] كه ما را در تجربياتشان در طراحي و كنترلگرهـاي PID سـهيم كردند، تأمين شد.

---

1 . Seborg
2 . Axcel Westernius
3 . Mike Sommerville
4 . Eurotherm

ما همچنين از مذاكره با مانفرد ماروري[1] از كلتـك[2]، ادگـار بريـستول[3] از فـاكس بورو[4]، كن گوف[5] كه پيشتر در ليدز اندنورتروپ[6] بود، تري بِلوينز[7] از فيشر ـ رزمانت[8]، و گريگوري مك مـيلان[9] از مونـسانتو[10]، بهـره بـرديم. تـشكرات ويـژة خـود را از سـون لارسن[11] كه اولين آزمايشات تنظيم خودكار ما را بنيان گذارد و لارس بت[12] كـه بـا او در خوشيها و خطرات ايجاد اولين تنظيم‌كنندة خودكار صنعتي خود سهيم بوديم، ابراز مي‌داريم. همچنين از بسياري مهندسين ابزار دقيق كه در آزمايشات شـركت كردنـد و كساني كه با سخاوت ما را در آزمايش‌هايشان سهيم كردند تـشكر مـي‌كنـيم. از ميـان همكاران تحقيقاتيمان، از پروفسور سي. سي. هانگ[13] از دانشگاه ملّي سنگاپور كه مدت زيادي با او تحقيقات مشتركي در اين زمينه داشتيم، مطالب زيادي آموختيم. همچنين از پر پرسون[14] كه روش طراحي قطب غالب را توسعه داد قدرداني مي‌نماييم.

اشخاص متعددي نسخه‌هاي دست‌نويس كتاب را مطالعه كردند. وايلي وجزنيـز[15] از فيشر ـ رزمانت پيشنهادات ارزندة بسياري براي اصلاح كار داد. بسياري از همكاران فعلـي

---

1 . Manfred Morari
2 . Caltech
3 . Edgar Bristol
4 . Foxboro
5 . Ken Goff
6 . Leed & Northrup
7 . Terry Blevins
8 . Fisher-Rosemount
9 . Gregory McMillan
10 . Monsanto
11 . Sune Larsson
12 . Lars Bååth
13 . C. C. Hang
14 . Per Persson
15 . Willy Wojsznis

و سابقمان در دانشکده، کمك فراوانی به ما کردند. تشکرات ويژة خود را از اوا داگنگـارد[1] و ليف آندرسن[2] که چيـدماني نـسخة نهـايي کتـاب را طراحـي کردنـد و بريـت- مـاري مارتنسون[3] که بسياري از شکل‌ها را کشيد، ابراز می‌داریم. اولف هلمبرگ[4]، کارل- اریـك آرزن[5] و مايکل جانسن[6] فعاليت بسيار مفيدي در نسخه‌هاي متعدد دستنويس کردند.

بالاخره، مايليم تشکرات عميق خود را نسبت به انجمن ملّي توسعة صنعتي و فني سوئد(NUTEK)[7] که تحقيقات ما را حمايت کردند، ابراز داريم.

کارل جان آُسترو م

تور هاگلاند

گروه کنترل خودکار — Department of Automatic Control

انستيتو تکنولوژي لاند — Lund Institute of Technology

سوئد- لاند- صندوق پستی 118, S-22100 — BOX 118, S-22100 Lund, Sweden

karl_johan.astrom@control.lth.se
tore.hagglund@control.lth.se

1 . Eva Dagengård
2 . Leif Andersson
3 . Britt-Marie Mårtensson
4 . Ulf Holmberg
5 . Karl-Erik Årzén
6 . Mikael Johansson
7 . National Board of Industrial and Technical Development

پیشگفتار مترجمین

موضوع کنترل خودکار همواره با کنترلگرهایPID عجین و همراه است. پیشرفت تکنولوژی به همراه پیشرفت تکنیک‌ها و روش‌های گوناگون کنترل و ارائه نظریه‌های بدیع در این زمینه، نه تنها موجب انزوای سیستم‌های کنترلPID نشده، بلکه سبب ابراز بیشتر قابلیت‌های آن‌ها در عین سادگی و همچنین توسعه و تکامل آنها با بهره گیری از تکنولوژی و نظریه‌های جدید شده است.

با مرور تاریخچه‌ای سیستم‌های کنترل خودکار، جایگاه ویژه کنترلگرهایPID در سیستم‌های کنترل فرایند و اتوماسیون در صنایع مختلف به خوبی نمایان می‌گردد. مهندسین کنترل و متخصصین ابزار دقیق از گذشته تا کنون مسائل خود را با استفاده از این نوع کنترلگرها حل کرده و می‌کنند و با پیچیده شدن فرایندهای تحت کنترل، اولین اقدام آنها به کار بردن روش‌های تنظیم مناسب و تعیین پارامترهای کنترلگرهای PID و پس از آن استفاده از تکنیک‌های تطبیقی در تنظیم پارامترهای مذکور است.

با وجود اهمیت سیستم‌های کنترلPID و لزوم آشنایی مهندسین مرتبط با زمینه کنترل به این موضوع چه از لحاظ فعالیت‌های صنعتی و چه از لحاظ نظریه‌های اساسی موجود در آن، این موضوع به اندازه کافی در متون کنترلی استانداردی که در دانشگاه‌ها تدریس می‌شوند پوشش داده نشده است و پرداخت به این موضوع به صورت مستقل، لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

نگارندگان این کتاب، اثری بی بدیل در زمینه سیستم‌های کنترلPID بر جای گذاشته‌اند که شهرت علمی آن در سطح بین المللی و مراکز علمی جهان بر اهل فن و

خبره مهندسی کنترل پوشیده نیست، چرا که کتاب حاضر حاصل سال‌ها تجربه و تدریس مؤلفین در این زمینه و همچنین نتیجه تحقیقات و آزمایشات گسترده آنها در فرایندهای صنعتی و سیستم‌های آزمایشگاهی است.

ترجمه حاضر تلاش بی وقفه و بی مدعایی است که سعی در حفظ امانت و ارائه صحیح و رسای مفاهیم به همراه به کار گیری کلمات معادل فارسی مناسب برای اصطلاحات فنی مهندسی کنترل دارد. امیدواریم که در این راه تا حدودی موفق عمل کرده باشیم. قطعاً این کار را از نقایص و اشکالات مبرا نمی‌دانیم. لذا از شما فرهیختگان استدعا داریم نقایص کتاب را بزرگوارانه گوشزد فرمایید تا در رفع آن‌ها کوشش کرده و در چاپ‌های بعدی مورد توجه قرار دهیم.

در خاتمه بر خود لازم می‌دانیم از همه کسانی که به نحوی ما را در این راه یاری کردند تشکر و قدردانی نماییم. انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر تلاش ارزشمندی را در جهت اشاعه فرهنگ و علوم دانشگاهی آغاز نموده و در این راستا پشتیبانی مؤثری را از نگارندگان و مترجمان انجام داده است. مایلیم از جناب آقای ابراهیم مسلمی به عنوان مدیر انتشارات دانشگاه و سایر همکاران ایشان صمیمانه تقدیر نماییم. آقایان حسین میرزایی در صفحه بندی و رفع اشکالات تایپی و حمید بیاتی در گرافیک کتاب تلاش فراوانی کردند که در اینجا از این عزیزان نیز تشکر می‌کنیم.

علیرضا خلیلی تهرانی

حسین شیرازی

مهرماه ۱۳۸۵

فصل اول

مقدمه

کنترلگر PID داراي توابع متعدد مهمي است: پسخور را فراهم مـي‌کنـد، قابليـت حذف افست‌هاي[1] حالت ماندگار را از طريق عمـل انتگرالـي دارد؛ مـي‌توانـد چگـونگي وضعيت را از طريق عمل مشتقي پيش‌بيني کند. کنترلگرهـاي PID بـراي بـسياري از مسائل کنترل به ويژه هنگامي‌که ديناميك‌هاي فرايند خوش‌رفتار و الزامات عملکـردي کم هستند، کافي است. کنترلگرهـاي PID بـه تعـداد زيـادي در همـة صـنايع يافـت مي‌شوند. اين کنترلگرها به شکل‌هاي مختلفي وجود دارند. سيستم‌هاي خاصـي داخـل جعبه‌ها براي يك يا تعداد کمي حلقه وجود دارد که سالانه صدها هزار از آنهـا سـاخته مي‌شود. کنترل PID جزء مهمي از يك سيستم کنترل گسترده[2] است. اين کنترلگرها در بسياري از سيستم‌هاي کنترل منظور خاص نيز يافت مي‌شوند. در کنترل صـنعتي، بيش از ۹۵% از حلقه‌هاي کنتـرل از نـوع PID و اکثـر حلقـه‌هـا در واقـع کنتـرل PI هستند. بسياري از حالات سودمند کنترل PID ، بـه دليـل ملاحظـات سـري تجـاري

---

1 . Offset
2 . Distributed Control Systems

به طور وسيع منتشر نشده‌اند. مثال‌هاي نـوعي ايـن گونـه مـوارد، تكنيـك‌هـاي مـورد استفاده براي سوييچ‌هاي مد و ضد اختتام[1] است.

كنترل PID غالباً با منطق، ماشين‌هاي ترتيبي، انتخابگرهـا و بلـوك‌هـاي تـابعي ساده براي ايجاد سيستم‌هاي اتوماسيون پيچيده مورد استفاده براي توليد انرژي، حمل و نقل و ساخت، تركيب مي‌شود. بسياري از استراتژي‌هاي كنترلي خبره، مانند كنتـرل پيش‌بيني مدل، نيز به نوبة خود سازمان داده مي‌شـوند. كنتـرل PID در پـايين‌تـرين سطح استفاده مي‌شود؛ كنترلگر چند متغيره نقاط مرجعـي بـراي كنترلگرهـاي سـطح پايين ايجاد مي‌كند. بنابراين كنترلگر PID را مي‌توان «نان و كـرة» مهندسـي كنتـرل ناميد. اين كنترلگر عنصر مهمي از هر جعبه ابزار مهندسي كنترل است.

كنترلگرهـايPID بـا تغييـرات زيـادي در محـدودة تكنولـوژي از نيوماتيـك تـا ريزپردازنده‌ها، از طريق لامـپ‌هـاي الكترونـي، ترانزيـستورها ومـدارات مجتمـع، بكـار رفته‌اند. ريزپردازنده‌ها اثر شگرفي بر كنترلگرPID داشته‌اند. در واقع همة كنترلگرهاي PID كه امروزه ساخته مي‌شوند بر اساس ريزپردازنده‌ها استوارند. اين موضـوع امكـان استفاده از ويژگي‌هايي مانند تنظيم خودكار[2]، جدول‌بندي بهـره[3] و تطبيـق پيوسـته را فراهم آورده است. اصطلاحات، در اين زمينه‌ها بخوبي بنا گذارده نـشده اسـت. در ايـن كتاب، تنظيم خودكار بدين معني است كـه پارامترهـاي كنترلگـر بـه محـض مطالبـة اپراتور يا يك سيگنال خارجي تنظيم شوند و تطبيق بدين معني است كه پارامترهـاي كنترلگر به طور پيوسته بهنگام گردند. در واقـع همـة كنترلگرهـاي PID كـه امـروزه

1 . Windup
2 . Auto – tuning
3 . Gain Schedualing

ساخته شده‌اند داراي قابليت‌هايي براي تنظيم خودكـار هـستند. تنظـيم و تطبيـق بـه طرق مختلفي قابل انجام هستند. كنترلگر ساده در واقع به يك دستگاه آزمايشي بـراي بسياري ايده‌هاي جديد در كنترل تبديل شده است.

ظهور فيلدباس[1]، توسعة مهم ديگري است. اين موضوع تـأثير مهمـي در سـاختار سيستم‌هاي كنترل گستردة آينده خواهد داشت. كنترلگر PID جزء مهمـي از مفهـوم فيلدباس اسـت. همچنـين امكـان دارد ايـن كنترلگـر بـه عنـوان نتيجـه‌اي از توسـعة فيلدباس، استاندارد شود.

گروه زيادي از مهندسـين ابـزار دقيـق و فراينـد بـا كنتـرل PID آشـنا هـستند. تجربه‌اي اساسي در پياده‌سازي، تنظيم و استفاده از اين كنترلگرها وجود دارد. علي‌رغم اين مطلب، پتانسيل‌هاي معتبري براي اصلاح كنترل PID موجود است. گواه اين امر را مي‌توان در فضاي كنترلي هر صنعتي يافت. بسياري از كنترلگرها براي مد دستي بكـار مي‌روند و در آن دسته از كنترلگرها كه در مد خودكار مورد استفاده قـرار مـي‌گيرنـد، عمل مشتق‌گيري به اين دليل سـاده كـه تنظـيم صـحيح آن مـشكل اسـت، خـاموش مي‌شود. دلايل كليدي عملكرد ضعيف، مـشكلات تجهيزاتـي در شـيرها، حـسگر[2]هـا و شيوة بد تنظيم است. مشكلات شيرها شامل اندازه گيـري غلـط، پـسماند و اصـطكاك است. مشكلات اندازه‌گيري شامل : فيلترهاي ضد اختلاط فركانـسي[3] ضـعيف يـا عـدم وجـود آنهـا؛ فيلتـراژ بـيش از حـد در حـسگرهاي "هوشـمند"[4]، نـويز بـيش از حـد و كاليبراسيون نامناسب است. اصلاحات اساسي قابل انجام است. محرك اين اصلاحات با

1 . Fieldbus
2. sensor
3 . Anti-aliasing filter
4 . Smart

تقاضاي بهبود كيفيت كه توسط استانداردهايي مانند ISO 9000 مطرح مي‌شود، تأكيد مي‌گردد. دانش و فهم، عناصر كليدي اصلاح عملكرد حلقة كنترل است. دانش فرايند خاص به همراه دانش در مورد كنترلPID لازم است.

بر اساس تجربه، ما معتقديم كه عرصة جديدي از كنترلPID در حال ظهور است. اين كتاب توسعة اين كنترلگرها را برانداز و پتانسيل آن را ارزيابي كرده و سعي بر سرعت بخشيدن به توسعه با مطرح كردن تجربيات ما در ميدان مهيج و مفيد كنترل خودكار دارد. هدف كتاب فراهم آوردن پيش زمينة فني براي درك كنترل PID است. چنين دانشي مي‌تواند مستقيماً به كيفيت بهتر توليد كمك كند.

ديناميك فرايند، كليدي براي فهم هر مسئلة كنترل است. فصل دوم روش‌هاي مختلف مدل سازي ديناميك فرايند را كه براي كنترلPID مفيد است ارائه مي‌كند. روش‌هايي كه بر اساس آزمون‌هاي پلّه استوارند به همراه روش‌هاي پاسخ فركانسي توضيح داده مي‌شوند. سعي مي‌شود فهم خوبي از ارتباطات بين روش‌هاي مختلف فراهم آيد. روش‌هاي مختلف به دست آوردن پارامترها در مدل‌هاي تابع تبديل ساده نيز ارائه مي‌شوند. دو پارامتر بدون بعد در اين فصل مطرح مي‌شوند: زمان مردة نرماليزه و نسبت بهره براي مشخص كردن خواص ديناميكي سيستم‌هاي متداول كنترل فرايند، مفيدند. روش‌هايي براي تخمين پارامتر نيز توضيح داده مي‌شوند. همچنين توصيف مختصري از مدل سازي اغتشاش ارائه مي‌گردد.

در فصل سوم، كنترلگر PID به طور عميق ارائه مي‌شود كه شامل اصول، به همراه بسياري از جزئيات پياده‌سازي مانند محدود كردن بهرة مشتق‌گيري، ضد اختتام، اصلاح پاسخ نقطة مرجع و غيره است. كنترلگر PID را مي‌توان به روش‌هاي

مختلفي تركيب كرد. شكل‌هاي متداول ايـن كنترلگرهـا، شـكل‌هـاي سـري و مـوازي هستند. تفاوت‌هاي موجود در اين روش‌هـا و پارامترهـاي كنترلگـر مـورد اسـتفاده در ساختارهاي مختلف به تفصيل ارائه مي‌شوند. همچنين پياده‌سازي كنترلگرهايPID با استفاده از كامپيوترهاي ديجيتال توضيح داده خواهد شد. مفاهيم اساسي نمونه‌برداري، انتخاب بازه‌هاي نمونه‌برداري و فيلترهاي ضد اختلاط فركانـسي بـه طـور كامـل ارائـه مي‌شوند و همچنين در مورد محدوديت‌هاي كنترلPID صحبت خواهد شد.

حالت‌هاي نوعي كه در آن اسـتفاده از كنترلگرهـاي پيچيـده‌تـر ارزشـمند اسـت، سيستم‌هاي با زمان مردة طولاني و سيستم‌هاي نوساني هـستند. توسـعة كنتـرلPID براي بكارگيري در چنين سيستم‌هايي به طور خلاصه مطرح مي‌شود.

فصل چهارم، روش‌هايي براي طراحي كنترلگرهايPID ارائه مي‌كند. توجه خاصّي به اطلاعات لازم براي استفاده از اين روش‌ها مـي‌شـود. سـپس بـسياري از روش‌هـاي مختلف تنظيم كنترلگرهايPID كه در طي سال‌ها توسعه يافته‌اند، معرفـي و خـواصّ آنها به طور كامل توضيح داده مي‌شود. يك روش طراحي معقول بايد اغتشاش‌هاي بار، عدم قطعيت مدل، نويز اندازه‌گيري و پاسخ نقطة مرجع را در نظـر بگيـرد. يـك عيـب قواعد قديمي تنظيم كنترلPID آن است كه اين قواعد همة موارد فوق را بـه طريقـي متعادل در نظر نمي‌گيرند. روش‌هاي تنظيم جديد كـه همـة ايـن معيارهـا را در نظـر مي‌گيرند نيز معرفي مي‌گردند.

نويسندگان به قوت بر اين عقيده‌اند كه هيچ چيز نمي‌تواند جاي فهم و ديد روشن را بگيرد. نظر به تعداد زياد كنترلگرهاي مورد استفاده در صـنعت، نيـاز بـه روش‌هـاي تنظيم ساده وجود دارد. چنين قواعدي حداقل از "تنظيم كارخانه‌اي" بهترند، اما همواره

مي‌توانند با مدلسازي فرايند و طراحي كنترل اصلاح شوند. در فصل پنجم مجموعـه‌اي از قواعد تنظيم جديد را معرفي مي‌كنيم كـه قواعـد قبلـي مـورد اسـتفاده را بـه طـور چشم گيري اصلاح مي‌كنند.

در فصل ششم بعضي از روش‌هاي تطبيق و تنظيم خودكـار كنترلگرهـاي PID را توضيح مي‌دهيم. ايـن قـسمت شـامل روش‌هـايي بـر اسـاس مـدل هـاي پـارامتري و روش‌هاي ناپارامتري اسـت. همچنـين بـراي توضـيح روش‌هـاي مختلـف، تعـدادي از كنترلگرهاي تجاري مطرح مي‌شوند. امكان اعمـال تـشخيص و آشكارسـازي عيـب در حلقة اولية كنترل نيز بحث مي‌شود.

در فصل هفتم نشان داده مي‌شود كه چگونه مي‌توان مسائل كنترل پيچيـده را بـا تركيب كنترلگرهاي ساده به روش‌هاي مختلـف حـل كـرد. الگوهـاي كنترلـي كنتـرل متوالي، كنترل پيشخور، تعقيب مدل، كنترل نسبت، كنترل بازة تكه شده[1] و كنترل با انتخاب گرها مورد بحث قرار مي‌گيرند. اسـتفاده از روش‌هـاي مـشهور امـروزي ماننـد شبكه‌هاي عصبي و كنترل فازي نيز به اجمال پوشش داده مي‌شود.

مراجع

نحوة عمل كنترل PID همراه با بسياري از نكات عملـي در شينـسكي[2] (۱۹۸۸) ارائه شده است. يك مرجع ژاپني نوشتة سودا[3] و همكاران (۱۹۹۲) وجود دارد. از ميان

1 . Split range control
2 . Shinsky
3 . Suda

کتاب‌هاي تنظيم کنترلگرهايPID مي‌توان به مك ميلان[1] (۱۹۸۳) و کوريپيو[2] (۱۹۹۰) که توسط ISA به چاپ رسيده است اشاره کرد.

نمونه‌هاي متعددي وجود دارد که بر پيشرفت صنعتي کنترل دلالت مـي‌کنـد. در سال ۱۹۸۹ انجمن سازندگان ابزار اندازه‌گيري الکتريکي ژاپن، يك بررسـي از وضـعيت سيستم‌هاي کنترل فرايند انجام داد (يامـاموتو[3] و هاشـيموتو[4] (۱۹۹۱) را ببينيـد). بـر اساس اين بررسي بيش از ۹۰% حلقه‌هاي کنترل از نوعPID بود.

مقالة بيالکوسکي[5] (۱۹۹۳) که دستگاه‌هاي چاپ روزنامه در کانادا را بررسي مي‌کند، نشان مي‌دهد که يك دستگاه نوعي شامل بيش از دو هزار حلقة کنتـرل اسـت و در ۹۷% اين حلقه‌ها از کنترل PI استفاده مي‌شود. مشخص شد که تنها ۲۰% از حلقه‌هاي کنتـرل به خوبي عمل کرده و قابليت تغيير فرايند را کاهش مي‌دهند. دلايل عملکـرد ضـعيف، در ۳۰% موارد، تنظيم ضعيف و در۳۰% ديگـر مـشکلات شـير بـوده.۲۰% باقيمانـده عملکـرد ضعيف کنترلگرها به دلايل متعددي مانند : مسائل حسگر، انتخاب بد نرخ نمونه‌بـرداري و فيلترهاي ضد اختلاط فرکانسي بوده است. مشاهده‌هـاي مـشابهي در انـدر[6] (۱۹۹۳) داده شده است، که در آن ادعا مي‌شود که ۳۰% کنترلگرهاي فرايند نصب شده، به طور دسـتي کار مي‌کنند و در ۲۰% حلقه‌ها از "تنظيم کارخانه‌اي" استفاده مي‌شـود، بـدين معنـي کـه پارامترها به صورت پيش فرض توسط سازندگان، مقداردهي مي‌شوند و ۳۰% از حلقه‌ها به دليل مشکلات تجهيزاتي در شيرها و حسگرها ضعيف عمل مي‌کنند.

---

1 . McMillan
2 . Corripio
3 . Yamamoto
4 . Hashimoto
5 . Bialkowski
6. Ender

فصل دوم

مدل‌هاي فرايند

۲-۱ مقدمه

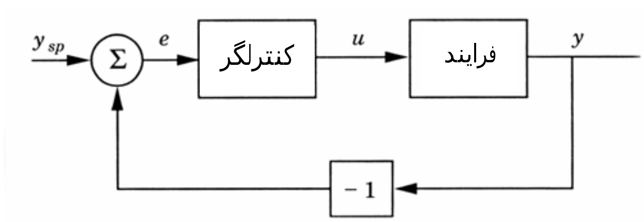
نمودار بلوكي يك حلقه كنترل ساده در شكل ۲-۱ نشان داده شده است. اين سيستم داراي دو عنصر اصلي است، فرايند و كنترلگر كه به‌صورت جعبه‌هايي با جهت‌هاي مشخص كنندة ارتباط علّي بين ورودي‌ها و خروجي‌ها نشان داده شده‌اند. ورودي فرايند, متغير عمل آمده[۱] است كه متغير كنترل نيز خوانده مي‌شود. اين ورودي با u نشان داده مي‌شود. خروجي فرايند، متغير فرايند (PV)[۲] ناميده شده و با y نشان داده مي‌شود. اين متغير توسط يك حسگر اندازه گيري مي‌شود. مقدار مطلوب متغير فرايند، نقطه تنظيم (SP)[۳] يا مقدار مرجع ناميده شده و با y_{sp} نشان داده مي‌شود. خطاي كنترل e اختلاف بين مرجع و متغير فرايند است، يعني $e = y_{sp}-y$. ورودي كنترلگر شكل ۲-۱ خطا، و خروجي آن متغير كنترل است. اين شكل نشان مي‌دهد كه فرايند و كنترلگر در يك حلقة پسخور بسته به يكديگر متصل مي‌شوند.

هدف سيستم آن است كه متغير فرايند را در حضور اغتشاش‌ها[۴]، نزديك به مقدار مطلوب نگه دارد. اين كار توسط حلقة پسخور به‌صورت زير انجام مي‌شود. فرض كنيد سيستم در حالت تعادل است و اغتشاشي واقع مي‌شود، بنابراين متغير فرايند بزرگتر از

1 . Manipulated Variable
2 . Process Variable
3 . Set Point
4 . disturbance

مرجع مي‌گردد. آنگاه خطا منفي شده و خروجي كنترلگر كاهش مي‌يابد كه باعث كاهش يافتن خروجي فرايند مي گردد. اين نوع از پسخور، پسخور منفي خوانده مـي‌شـود، زيـرا متغير عمل آمده، در خلاف جهت متغير فرايند حركت مي‌كند.

كنترلگر داراي تعدادي پارامتر است كه بايد تنظيم[1] شود. اگر پارامترهـا بـه طـور مناسب انتخاب شوند حلقة كنترل به خوبي عمل مي‌كند. در غيـر اينـصورت عملكـرد حلقه ضعيف خواهد بود، به طور مثال ممكن است سيستم ناپايـدار شـود. نحـوة پيـدا كردن پارامترهاي كنترلگر، تنظيم[2]خوانده مي‌شود.



شكل ۲-۱ نمودار بلوكي يك سيستم پسخور ساده

اين كار را با دو روش مي‌توان انجام داد. يك روش آن است كه پارامترهاي كنترلگـر انتخاب شده, رفتار سيستم پسخور مشاهده و پارامترها براي رسـيدن بـه رفتـار مطلـوب اصلاح شوند. روش ديگر آن است كه ابتدا مـدلی رياضـي بـراي توصـيف رفتـار فراينـد، توسعه يافته، سپس پارامترهاي كنترلگر با استفاده از روش‌هاي طراحـي كنتـرل تعيـين

1 . Adiust
2 . Tuning

گردند. داشتن فهمي از روش‌هاي تعيين ديناميك فرايند[1] ، پيش زمينه‌اي لازم براي هـر دو روش تنظيم كنترلگر است. در اين فصل چنين روش‌هايي معرفي مي‌گردند.

مدل‌هاي ايستا در بخش بعدي توضيح داده مي‌شود. مدل‌هاي ديناميكي در بخش ۲-۳ معرفي مي گردند. روش‌هاي پاسخ گذار كه براي تعيين مدل‌هاي ديناميكي ساده فرايند قابل استفاده اند در بخش۲-۴ مطرح مي‌شوند.

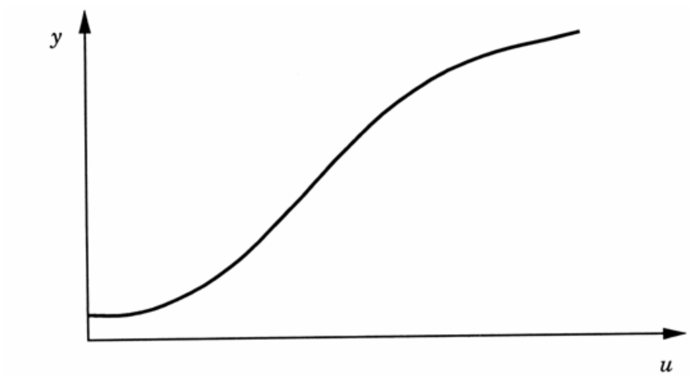
در بخش۲-۵ در مورد روش‌هايي بر اساس گشتاورها بحث مي‌شود. ايـن روش‌هـا حساسيت كمتري به نويز اندازه گيري دارند و علاوه بر اين به سيگنال ورودي خاصّـي محدود نمي‌شود. روش‌هاي پاسخ فركانـسي را كـه در بخـش۲-۶ معرفـي مـي‌گردنـد مي‌توان هم براي بدست آوردن مدل‌هاي ساده و هم توصيف‌هاي دقيقتر استفاده كرد.

روش‌هايي كه بر اساس تخمين مـدل‌هـاي پـارامتري كـار مـي‌كننـد روش‌هـاي پيچيده‌تري هستند كه نياز به محاسبات بيشتري داشته اما از محدوديت‌هاي كمتري در آزمايش‌ها برخوردارند. اين روش‌ها در بخش ۲-۷ معرفي مي‌گردنـد. روش‌هـايي كـه تـا اينجا مورد بحث قرار گرفتند ارتباط بين ورودي و خروجي فرا يند را توصيف مي‌كنند. مدل كردن اغتشاش‌هاي مؤثر بر سيستم نيز مهـم اسـت. ايـن موضـوع در بخـش۲-۸ توضيح داده مي‌شود. در بخش ۲-۹ روش‌هايي براي ساده سازي يك مـدل پيچيـده و مسألة ديناميك مدل نشده و خطاهاي مدل سازي مطرح مـي‌شـود. نتـايج و مراجـع در بخش‌هاي۲-۱۰ و ۲-۱۱ ارائه مي‌گردند.

1 . Process dynamics

۲-۲ مدل‌هاي ايستا

مشخصة ايستاي فرايند, منحني است كـه رابطـة حالـت مانـدگار بـين سـيگنال ورودي فرايند u و خروجي فرايند y را مي‌دهد. (شكل ۲-۲ را ببينيد). توجه كنيد كـه اين منحني تنها براي يك سيستم پايدار داراي تعبيري فيزيكي است.



شكل ۲-۲ مشخصه ايستاي فرايند. اين مشخصه خروجي فرايند y را به‌صورت تابعي از ورودي فرايند u تحت شرايط ايستا نشان مي‌دهد.

كليه بررسي‌هاي فرايند بايد با تعيين مدل ايستاي فرايند شروع شوند. ايـن مـدل مي‌تواند براي تعيين محدودة سيگنال‌هاي كنترل لازم براي تغيير دادن خروجي فرايند در محدودة مطلوب، برآورد عملگر[1]ها و انتخاب تفكيك پذيري حسگر، مـورد اسـتفاده قرارگيرد. همچنين مي‌توان از آن براي ارزيابي اينكه آيـا تغييـرات بهـرة اسـتاتيك بـه قدري بزرگ است كه در طراحي كنترل وارد شود يا خير، استفاده كرد.

1. actuator

مدل ایستا را از روش‌هاي مختلفي مي‌توان به دست آورد. آن را مـي‌تـوان توسـط يك آزمايش حلقه - باز كه در آن سيگنال ورودي مقداري ثابت بوده و خروجي فرايند هنگام رسيدن به حالت ماندگار اندازه گيري مي‌شود تعيين كرد. اين كـار نقطـه‌اي را روي مشخصه‌هاي فرايند مشخص مي‌كند. سپس آزمايش براي پوشش دادن محـدودة كامل ورودي تكرار مي‌شود.

يك روش جايگزين، انجام يك آزمايش حلقه- حلقه بـسته اسـت. در ايـن حالـت نقطة مرجع مقداري ثابت بوده و متغير كنترل متناظر در حالت ماندگار انـدازه گيـري مي‌شود. سپس آزمايش براي پوشش دادن محدودة كامل نقاط مرجع تكرار مي‌گردد.

آزمايش‌هاي لازم براي تعيين مدل ايستاي فرايند، اغلب حـس درونـي خـوبي در اين مورد مي‌دهد كه چگونه كنترل فرايند ساده است, اگر پايدار بوده و اغتـشاش‌هـاي زيادي وجود داشته باشد.

گاهي اوقات اعمال فرايند اجازه نمي‌دهند كه آزمايشات آنچنان كه در بالا توضيح داده شد انجام شوند. آشفتگي‌هاي[1] كوچك به طور نرمال مجازند، ليكن ممكـن اسـت حركت دادن فرايند در محدودة كامل كار، امكان پذير نباشـد. در چنـين حـالتي بايـد آزمايش در يك پريود طولاني زمان انجام شود.

نويز فرايند

اغتشاش‌هاي فرايند به سادگي با ثبت خروجي فرايند هنگام ثابت بودن سـيگنال كنترل تعيين مي‌گردند. اين كار تركيبي از اغتشاش‌هاي اندازه گيـري و بـار را نتيجـه مي‌دهد. تكنيك‌هاي خبره[2] بسياري مانند تحليـل سـري‌هـاي زمـاني و تحليـل طيفـي را

1 . Perturbation
2 . Sophisticoted techniques

مي‌توان براي تعيين مشخصه‌هاي نويز فرايند به كار برد. تخمين‌هاي خاصي از مشخصه‌هاي نويز به سادگي با اندازه گيري مقدار اوج به اوج و تعيين ميانگين زماني بين نقاط قطع صفر سيگنال خطا به دست مي‌آيند. اين موضوع در بخش۲-۸ بيشتر توضيح داده مي‌شود.

۲-۳ مدل‌هاي ديناميكي

مدل ايستاي فرايند همانگونه كه در بخش قبل گفته شد رابطة حالت ماندگار بين سيگنال ورودي و خروجي را مشخص مي‌كند. مدل ديناميكي رابطة بين سيگنال ورودي و خروجي را در حالات گذرا بيان مي‌كند. طبيعتاً به دست آوردن رفتار ديناميكي بسيار مشكل تر است. ليكن هنگام توصيف مسائل كنترل، بسيار مهم است.

خوشبختانه دستة محدودي از مدل‌ها وجود دارند كه اغلب قابل استفاده اند و در سيستم‌هاي تغييرناپذير با زمان[1] بكار مي‌روند. چنين مدل‌هايي اغلب براي توصيف رفتار سيستم‌هاي كنترل هنگامي كه انحرافات كمي از حالت تعادل وجود دارد بكار مي‌روند. اين حقيقت كه سيستمي خطي است نتيجه مي‌دهد كه اصل جمع آثار[2] در آن برقرار است. اين بدان معنا است كه اگر ورودي u_1 , خروجي y_1 و ورودي u_2، خروجي y_2 را بدهد، آنگاه ورودي $bu_1 + ay_2$، خروجي $ay_1 + by_2$ را نتيجه خواهد داد. يك سيستم تغييرناپذير با زمان است، اگر رفتارش با زمان تغيير نكند.

يك خاصيت خيلي خوب سيستم‌هاي خطي تغييرناپذير با زمان آن است كه مي‌توان پاسخ آنها به يك ورودي دلخواه را به طور كامل برحسب پاسخ به يك سيگنال

1 . Time-invariant
2 . Superposition principle

ساده مشخص کرد. سيگنال‌هاي مختلف بسیاری مي‌توانند بـراي مـشخص كـردن يـك سيستم مورد استفاده قرار گيرند. به طور كلي مي‌توان بين پاسـخ‌هـاي گـذرا و فركانـسي تفاوت قائل شد.

در يك سيستم كنترل نوعاً تنها با دو سيگنال سر و كار داريم، سيگنال كنتـرل و متغير اندازه گيري شده. همانطور كه در اينجا توضيح داده‌ايم ديناميك فرايند تنها بـه رابطة بين سيگنال‌هاي ذكر شده در بالا مربوط است. بـه طـور ايـده‌آل، متغيـر انـدازه گيري بايد رابطه نزديكي با متغير فيزيكي فرايند مورد نظر داشـته باشـد. از آنجـا كـه ساخت حسگرها مشكل است، گاهي اتفاق مي‌افتد كـه ديناميـك قابـل ملاحظـه‌اي در رابطة بين متغير فرايند صحيح و حسگر وجود داشـته باشـد. بـه عنـوان مثـال، وجـود ثابتهاي زماني ذاتي در حسگرهاي دما بسيار متداول است. همچنين ممكن است نـويز اندازه گيري و ساير عيب‌ها وجود داشته باشد. امكان وجود ديناميك قابل ملاحظـه در محرك‌ها نيز وجود دارد. براي انجام يك كنتـرل خـوب، لازم اسـت از منـشأ فيزيكـي ديناميك فرايند مطلع شويم تا بتوانيم قضاوت كنيم كه آيا واقعاً پاسخ خوبي در متغير اندازه گيري شده پاسخي خوب در متغير فرايند را نتيجه خواهد داد يا خير.

پاسخ‌هاي گذرا

در تحليل پاسخ گذرا، رفتار سيستم برحسب پاسخ به يك سيگنال ساده توصـيف مي‌شود. اين سيگنال خاص اغلب به گونه‌اي انتخاب مي‌شود كه توليد آزمايشي آن سـاده باشد. مثال‌هاي نوعي از اينگونه سيگنال‌ها، پله‌ها، پالس‌ها و ضربه‌هـا هـستند. بـه دليـل اصلي جمع آثار مي‌توان سيگنال‌ها را نرماليزه كرد. به طور مثال كافي است پاسـخ بـه

پله‌اي با دامنة واحد را در نظر بگيريم. اگر $s(t)$ پاسخ به يك پلة واحـد باشـد. خروجـي $y(t)$ به سيگنال دلخواه $u(t)$ به‌صورت زير است:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} u(\tau)\frac{ds(t-\tau)}{dt}d\tau = \int_{-\infty}^{t} u(\tau)h(t-\tau)d\tau \qquad (۱-۲)$$

كه پاسخ ضربة $h(t)$ به‌صورت مشتق زماني پاسخ پله اعمال مي‌شود. در منابع اخير كنترل فرايند، پاسخ پله، منحني عكس العمل[1] نيز خوانده شده است.

تحليل پاسخ پالس در كاربردهاي پزشكي و زيست شناسي متداول اسـت، امـا در كنترل فرايند معمول نيست. تحليل پاسخ شيب كمتر بكـار مـي رود. يـك كـاربرد آن مشخص كردن قـسمت مـشتقي كنترلگـر PID اسـت. در كنتـرل فراينـد، پاسـخ پلـه متداول‌ترين روش پاسخ گذرا است كه براي شناسايي فرايند بكار مي‌رود. دليـل اوليـة اين امر آن است كه ايـن سـيگنال، نـوعي اغتـشاش اسـت كـه از نظـر توليـد دسـتي ساده‌ترين است. روش‌هاي پاسخ گذرا در بخش ۲-۴ به تفصيل ارائه مي‌گردد.

پاسخ فركانسي

روش ديگر توصيف ديناميك يك سيستم خطي تغييرناپذير با زمـان، اسـتفاده از موج‌هاي سينوسي به عنوان سيگنال آزمايش است. اين موضوع بـه نظريـة فوريـه بـر مي‌گردد. ايدة اين نظريه آن است كه ديناميك سيستم را مي‌توان با بررسـي چگـونگي انتشار موج‌هاي سينوسي در آن توصيف كرد.

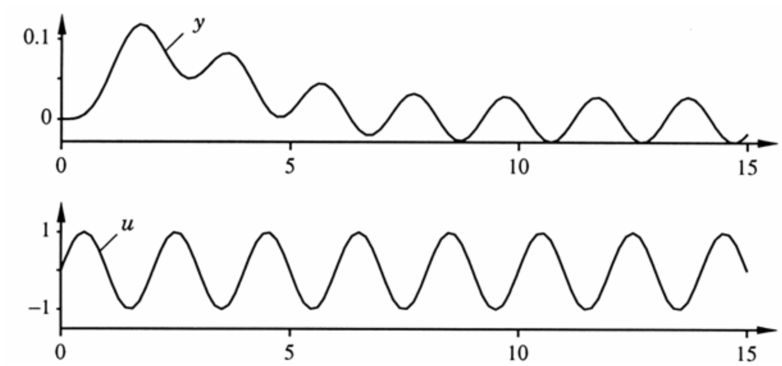
يك سيستم خطي پايدار را در نظـر بگيريـد. اگـر سـيگنال ورودي سيـستم يـك سينوس باشد، آنگاه سيگنال خروجي نيز پس از يك حالت گذرا سينوسي خواهد بـود

1 . Reaction curve

(شکل ۲-۳ را ببینید). خروجي داراي همان فرکانس سیگنال ورودي است. تنها فـاز و دامنهٔ ورودي و خروجي متفاوت است. این بدان معناست کـه تحـت شـرایط ایـستان[1]، رابطهٔ بین ورودي و خروجي با دو عدد قابل توصیف است:

خارج قسمت (a) بین دامنهٔ ورودي و خروجي و انتقال فاز (φ) بین سـیگنال‌هـاي ورودي و خروجي. توابع $a(\omega)$ و $\varphi(\omega)$، a و φ را براي همهٔ فرکانس‌هـاي ω توصـیف مي‌کنند. به سادگي مي‌توان a و φ را به‌صورت دامنه و فاز یك عدد مختلف دید:

$$G(i\omega) = a(\omega)e^{i\varphi(\omega)} \qquad (۲-۲)$$



شکل ۲-۳ سیگنال ورودي u یك سینوس است و سیگنال خروجي پس از یك حالت گذرا سینوسي مي‌شود.

تابع $G(i\omega)$ ، تابع پاسخ فرکانسي سیستم نامیده مي‌شـود. تـابع $a(\omega) = |G(i\omega)|$، تابع دامنه و تابع $\varphi(\omega) = \arg(G(i\omega))$، تابع فاز خوانده مي‌شود.

1 . Stationary conditions

عدد مختلط $G(i\omega)$ را مي‌توان توسط برداري با طول $a(i\omega)$ كه با محور حقيقـي زاوية $\varphi(i\omega)$ مي‌سازد نمايش داد (شكل ۲-۴ را ببينيد). وقتي كه فركانس از صفر بـه سمت بي نهايت مي‌رود, نقطه انتهايي ايـن بـردار يـك منحنـي را در صـفحه ترسـيم مي‌كنـد كـه منحنـي فركانـسي يـا منحنـي نايكوييـست[1] ناميـده مـي‌شـود. منحنـي نايكوييست توصيف كاملي از سيستم ارائه مي‌دهد. اين منحني را مـي‌تـوان بـه‌صـورت آزمايشي با فرستادن سينوس‌هايي با فركانس‌هاي مختلف به سيستم تعيـين كـرد كـه اين كار ممكن است وقت گير باشد. معمولاً كافي است تنهـا قـسمت‌هـايي از منحنـي نايكوييست را بشناسيم. براي تنظيم كنترلگر قسمت‌هايي از اين منحني داراي اهميت ويژه‌اي هستند. پايين‌ترين فركانسي كه در آن مقدار فاز برابر °۱۸۰- اسـت، فركـانس غايي[2] (ω_u) و نقطة متناظر آن روي منحني نايكوييست، نقطه غايي ناميده مـي‌شـود. مقدار $G(i\omega)$ همة چيزي است كه براي روش‌هاي تنظيم ارائه شـده توسـط زيگلـر[3] و نيكولز[4] لازم مي‌شود.

پاسخ فركانسي رابطة نزديكي با تبديل لاپلاس دارد. فرض كنيد $f(t)$ يك سيگنال باشد، آنگاه تبديل لاپلاس آن، $F(s)$ به‌صورت زير تعريف مي‌شود:

$$F(s) = \int_{0}^{\infty} e^{-st} f(t) d(t) \qquad (۲-۳)$$

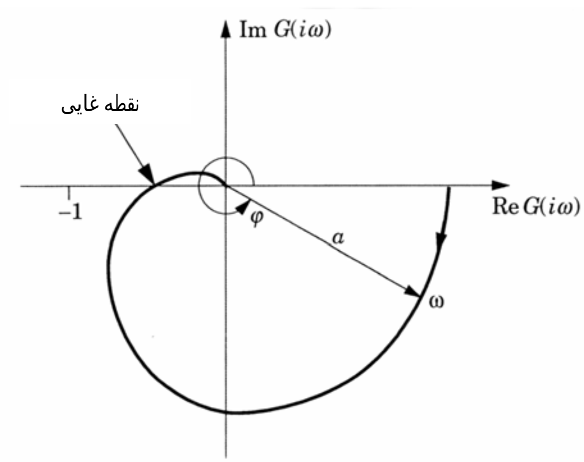
1 . Nyquist curve
2 . Ultimate frequency
3 . Ziegler
4 . Nichols

فرض کنید $U(s)$ و $Y(s)$ تبدیل لاپلاس ورودي و خروجي يك سيستم ديناميكي خطي تغييرناپذير با زمان باشند و همچنين سيستم در زمـان $t = ۰$ در حـال آرامـش است، آنگاه رابطة زير برقرار است:

$$Y(s) = G(s)\ U(s) \qquad (۴-۲)$$

که در آن $G(s)$ تابع تبديل سيستم است.

از معادلة (۲-۳) نتيجه مي‌شود كه تبديل لاپلاس ضربه برابـر ۱ اسـت. از معادلـة (۲-۴) مي‌توان نتيجه گرفت كه $G(s)$ تبديل لاپلاس پاسخ ضربه است. پاسخ فركانسي به سادگي به‌صورت $G(i\omega)$ به دست مي‌آيد.



شكل ۲-۴ منحني نايكوييست يك سيستم

در بخش بعد نشان خواهيم داد كه چگونه مي‌تـوان ديناميـك سيـستم خطـي را بطور آزمايشي به دست آورد. هـر دو روش پاسـخ گـذرا و پاسـخ فركانـسي را توضـيح خواهيم داد.

۲-۴ روش‌هاي پاسخ پله

ديناميك يك فرايند را مي‌توان از پاسخ آن به سيگنال‌هاي پالس، پلـه، شـيب و يـا ساير سيگنال‌هاي قطعي تعيين كرد. ديناميك يك سيستم خطي اصـولاً از يـك چنـين آزمايش پاسخ گذرايي بطور يكتا حاصل مي‌شود. ليكن اين در صورتي است كـه سيـستم قبل از اعمال ورودي در حال آرامش بوده و خطاهاي اندازه گيري وجود نداشته باشد. در عمل حصول اطمينان از در حال آرامش بودن سيستم مشكل است، همچنين يك سـري خطاهاي اندازه گيري وجود خواهد داشت. بنابراين روش پاسخ گذرا در عمـل بـه تعيـين مدل‌هاي ساده محدود مي‌شود. ليكن مدل‌هاي به دسـت آمـده از يـك آزمـايش حالـت گذرا، اغلب براي تنظيم كنترلگر PID كافي هستند. استفاده از اين روش‌ها بـسيار سـاده است. اين بخش بر روش پاسخ پله تمركز مي‌كند.

پاسخ پله

حلقة كنترلي را با يك كنترلگر در نظر بگيريد، آزمايش پاسخ پلـه بـدين ترتيـب تعيين مي‌شود. صبر كنيد تا فرايند به حالت آرامش برسد. كنترلگر را در حالت دسـتي قرار دهيد. متغير كنترل را بطور مثال از طريق استفاده از دكمه‌هاي افزايش/ كاهش به سرعت تغيير دهيد. متغير كنترل را ثبت و آن را با تقسيم كـردن بـر تغييـرات متغيـر كنترل، مقياس كنيد. براي به دست آوردن حداكثر نسبت سيگنال بـه نـويز، تغييـرات متغير كنترل بايد تا حد امكان بزرگ باشد. عملكـرد مجـاز فراينـد، محـدوديت ايجـاد مي‌كند. ثبت كردن نوسانات سيگنال اندازه گيري هنگام ثابت بودن سيگنال كنترل نيز مفيد است. اين كار اطلاعاتي در مورد نويز فرايند مي‌دهـد. تكـرار ايـن آزمـايش بـراي

مقادير مختلف دامنة سيگنال ورودي و در شرايط كار مختلف، تجربة خوبي است. ايـن كار محدوده‌هاي سيگنال را هنگامي كه مدل خطي باشد مشخص مي‌كنـد. همچنـين نشان مي‌دهد كه آيا فرايند با شرايط كار تغيير مي‌كند يا خير.

مثال‌هايي از پاسخ‌هاي پله حلقه- باز در شكل۲-۵ نشان داده شده است. بسياري از خواص سيستم را مي‌توان مستقيماً از پاسخ پله خواند. در شكل ۲-۵ (الف)، خروجي فرايند به طور يكنوا به يك مقدار جديد ايستان تغيير داده مي‌شود. اين متـداول‌تـرين حالت پاسخ پله است كه در كنترل فرايند با آن مواجه مـي‌شـويم. در شـكل۲-۵ (ب)، خروجي فرايند حول مقدار نهايي ايستانش نوسان مي‌كند. اين نوع پردازش در كنتـرل فرايند، معمول نيست. يكي از مواردي كه اين حالـت اتفـاق مـي‌افتـد، كنتـرل غلظـت سيالات دوار است. ليكن در طراحي‌هاي مكانيكي كه در آن از مواد قابل ارتجاعماننـد ميله‌هاي ضعيف در سروها، ساختارهاي فنري و غيـره اسـتفاده مـي‌شـود، فراينـدهاي نوساني متداولند. سيـستم‌هـاي شـكل هـاي ۲-۵ (الـف) و (ب) پايدارنـد، حـال آنكـه سيستم‌هاي نشان داده شده در شكل‌هاي ۲-۵ (ج) و ۲-۵ (د) ناپايدار هستند. سيستم شكل ۲-۵ (ج) خروجي يك فرايند انتگرالي را نشان مي‌دهد. مثال‌هايي از فراينـدهاي انتگرالي عبارتند از كنترل سطح، كنترل فشار در ظرف بسته، كنترل غلظت در بسته‌ها و كنترل دماي اتاق‌ها. عامل مشترك همة ايـن فراينـدها آن اسـت كـه نـوعي ذخيـره سازي در آن‌ها اتفاق مي‌افتد.

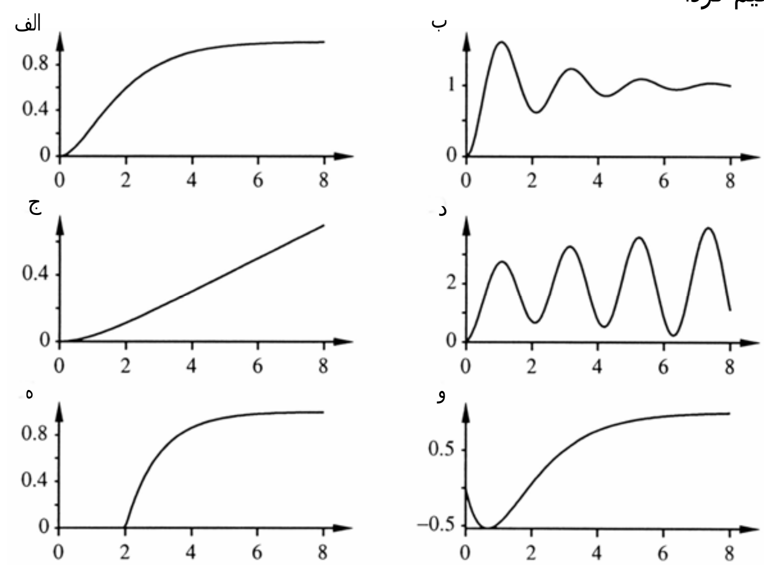
در كنترل سطح، فشار و غلظت, ذخيره سازي جرم اتفاق مي‌افتد، حـال آنكـه در حالت كنترل دما, انرژي ذخيره مي‌شود. سيستم شكل۲-۵ (ه) داراي يك زمـان مـردة بزرگ است. زمان مرده هنگامي اتفاق مي‌افتد كه در فرايند، تأخيرهاي انتقـالي وجـود

داشته باشد. سيستم شکل۲-۵ (و) سيستمي ناکمينـه فـاز اسـت کـه در آن سـيگنال اندازه‌گيري در ابتدا در جهت " اشتباه " حرکت مي‌کند. سطح آب در ديگ‌هـاي بخـار اغلب پس از يك تغيير پله‌اي در جريان آب تغذيـه، چنـين عکـس العملـي دارد. اگـر سيستم خطي باشد، همة پاسخ‌هاي پله بـا انـدازة پلـه در سـيگنال ورودي متناسـبند. بنابراين نرماليزه کردن فرايند با تقسيم سيگنال اندازه گيـري بـر طـول گـام سـيگنال کنترل مناسب است. ما در سراسر اين کتاب فرض مي کنيم که عمل نرمـاليزه کـردن انجام مي‌شود.

پاسخ پله به دليل سادگي تعبير فيزيکي آن روش مناسبي براي توصيف ديناميك فرايند است. بسياري از روش‌هاي تنظيم بر اساس آن هـستند. همچنـين مـي‌تـوان از پاسخ پله يك مدل رياضي شکيل به دست آورد که در اين صورت روش‌هـاي عمـومي طراحي سيستم‌هاي کنترل قابل استفاده خواهند بود.

براي آشفتگي‌هاي کوچك، مدل ايستاي فرايند را مي‌توان با يك پـارامتر کـه بهـرة فرايند خوانده مي‌شود توصيف کرد. اين بهره به سادگي نسبت تغييـرات حالـت مانـدگار خروجي فرايند و ورودي آن است که مي‌توان آن را به‌صورت شيب منحني شکل۲-۲ بـه دسـت آورد. همچنـين مـستقيماً از پاسـخ پلـه قابـل محاسـبه اسـت. بهـرة فراينـد در سيستم‌هاي غيرخطي به شرايط کار وابسته خواهد بود، ليکن در سيستم‌هاي خطي ثابت است. بنابراين در چنين سيستم‌هايي خواص ايستا توسط يك پارامتر توصيف مـي‌شـوند. براي اينکه ديناميك سيستم نيز در برگرفته شود به پارامترهاي اضافي نيـاز اسـت. ذيـلاً بعضي از مدل‌هاي پارامتري ساده توضيح داده خواهند شد. فرايندهاي پايدار با پاسخ پلـه يکنوا مانند آنچـه در شـکل۲-۵ (الـف) نـشان داده شـده، بـسيار متداولنـد. بـسياري از

روش‌هاي به دست آوردن مدل‌هاي پارامتري از چنين پاسخ پلـه‌اي در طـي سـال‌هـا در منابع مختلف معرفي شده است. ما در اينجا مدل‌هاي با دو، سه و چهار پارامتر را معرفـي خواهيم كرد.



شكل ۲-۵- پاسخ‌هاي پله حلقه- باز

مدل‌هاي دو پارامتري

ساده‌ترين مدل پارامتري ديناميك فراينـد داراي دو پـارامتر اسـت. يـك پـارامتر مي‌تواند بهره فرايند باشد. پارامتر ديگر بايد رفتار زمـاني را دربـر داشـته باشـد. زمـان اقامت ميانگين[1] T_{ar} پارامتر مفيدي است كه به‌صورت زير به دست مي‌آيد:

$$T_{ar} = \frac{A_{\circ}}{K}$$

1 . Average residence time

كه در آن، K بهرة ايستاي فرايند است و $A_{\circ}$ به‌صورت زير تعريف مي‌شود:

$$A_{\circ} = \int_{\circ}^{\infty} (s(\infty) - s(t))dt$$

كه در آن $s(t)$ پاسخ پله است. توجه كنيد كه $K = s(\infty)$ و $A_{\circ}$ سطح هاشور خورده در شكل ۲-۶ است.

زمان T_{ar} يك اندازه گيري تقريبي از زمان نشست پاسخ پله است. با استفاده از بهرة ايستا و زمان اقامت ميانگين مي‌توان فرايند را با مدل زير تقريب زد:

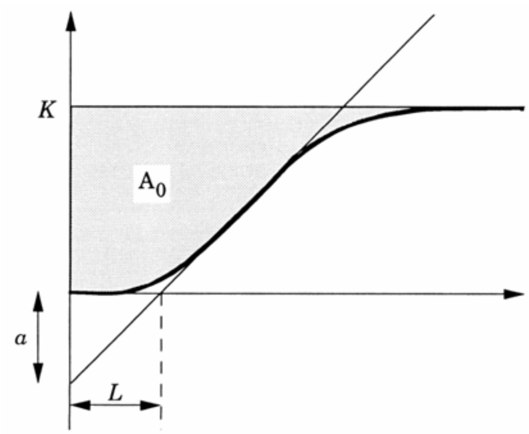
$$G_{۲a}(s) = \frac{K}{۱ + sT_{ar}} \quad (۵\text{-}۲)$$

اين مدل را تقريب زمان اقامت مي‌ناميم.

تقريب ديگري از پاسخ پله كه آن نيز داراي دو پارامتر است توسط تابع تبديل زير به دست مي‌آيد:

$$G_{۲b}(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL} \quad (۶\text{-}۲)$$

اين مدل با يك انتگرال گير داراي زمان مرده متناظر است. اين مدل با دو پارامتر a و L كه به سادگي به‌صورت ترسيمي از پاسخ پله تعيين مي‌شوند مشخص مي‌گردد (شكل۲-۶ را ببينيد). مماس داراي بيشترين شيب بر پاسخ پله $s(t)$ رسم شده و تقاطع اين خط با محورهاي عمودي و افقي به ترتيب a و L را نتيجه مي‌دهد. مدل معادلة (۲-۶) اساس روش تنظيم زيگلر- نيكولز است كه در فصل چهارم توضيح داده مي‌شود. توجه كنيد كه اين مدل مي‌تواند به فرايندهاي ناپايدار نيز برازنده شود.



شكل ۲-۶- تعيين يك مدل دو پارامتري از پاسخ پله براي سيستمي پايدار با پاسخ پله يكنوا به روش ترسيمي.

خواص تقريب‌هاي (۲-۵) و (۲-۶) با يك مثال توضيح داده مي‌شود.

مثال ۲-۱

مدل‌هاي دو پارامتري (۲-۵) و (۲-۶) به مدل فرايند

$$G(s) = \frac{۱}{(s+۱)^{۸}} \quad (۲\text{-}۷)$$

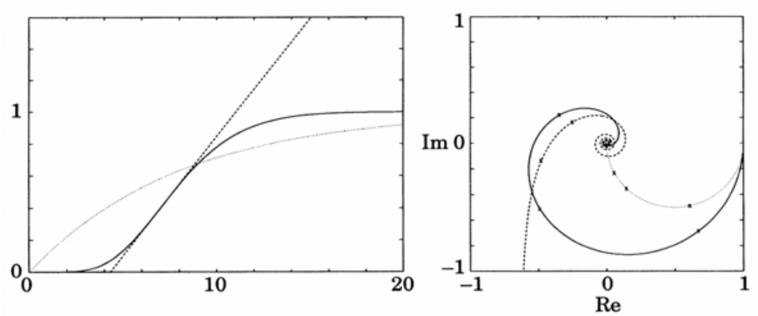
برازنده شده‌اند. در نتيجه مدل‌هاي زير به دست آمده‌اند:

$$G_{۲a}(s) = \frac{۱}{۱+۸s}$$

$$G_{۲b}(s) = \frac{۰/۶۴}{۴/۳s} e^{-۴/۳s}$$

شـكل۲-۷ پاسـخ‌هـاي پلـه و منحنـي‌هـاي نايكوييـست توابـع تبـديل را نـشان مي‌دهد. توجه كنيد كه مدل $G_{۲a}$ توصيفي خوب از پاسخ پله را براي زمان‌هاي طـولاني نتيجه مي‌دهد. بهرة ايستا صحيح است و پاسخ پلـه بـراي مقـادير بـزرگ t بـه مقـدار صحيح بسيار نزديك است. ليكن اختلاف زيادي براي مقادير كوچك t وجود دارد. براي مثال سيستم $G_{۲a}$ در زمان۲= t پاسخ مهمي دارد، اما سيستم (۲-۷) به زحمـت در آن زمان پاسخي دارد. مدل $G_{۲b}$ خواص متضادي دارد. اين مدل پاسخ پله صحيح را در بازة ۵≤t≤۹ به خوبي تقريب مي‌زند، اما اين تقريب براي مقادير بزرگ t بسيار ضعيف است.

اين خواص در منحني‌هاي نايكوييست نيز منعكس مي‌شود. اين منحنـي‌هـا نـشان مي‌دهند كه تقريب زمان اقامت ميانگين در فركانس‌هاي پايين كاملاً خوب اسـت، لـيكن در فركانس‌هاي بالا بسيار ضعيف مي‌باشد. از طـرف ديگـر، مـدل $G_{۲b}$ در فركـانس‌هـاي پايين ضعيف بوده اما در فركانس‌هاي ناحية متوسط، معقول است.



شكل ۲-۷ پاسخ‌هاي پله و منحني‌هاي نايكوييست فرايند $G(s) = ۱/(s+۱)^{۸}$ (خط پر) و مدل‌هاي دو پارامتري

$G_{۲a}$ (نقطه چين) و $G_{۲b}(s)$ (خط چين).

مدل‌هاي سه پارامتري

با افزايش تعداد پارامترها تقريب‌هاي بهتري به دست مي‌آيد. مدل

$$G(s) = \frac{K}{۱+sT}e^{-sL} \tag{۸-۲}$$

با سه پارامتر مشخص مي‌شود: بهرة ايستاي K ، ثابت زماني T و زمـان مـردة L . اين معمول ترين مدل فرايند اسـتفاده شـده در مقـالاتي اسـت کـه در مـورد تنظـيم کنترلگر PID صحبت مي‌کنند. پارامترهاي L و T اغلب به ترتيب *زمان مردة ظاهري*[1] و *ثابت زماني ظاهري*[۲] خوانده مي‌شوند. پاسخ پله مدل (۲-۸) به‌صورت زير است:

$$s(t) = K(۱-e^{-(t-L)/T})$$

از اين معادله نتيجه مي‌شود که زمان اقامت ميانگين برابر

$$T_{ar} = \frac{\int_{۰}^{\infty}(s(\infty)-s(t))dt}{K} = L+T$$

است. نسبت

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_{ar}} \tag{۹-۲}$$

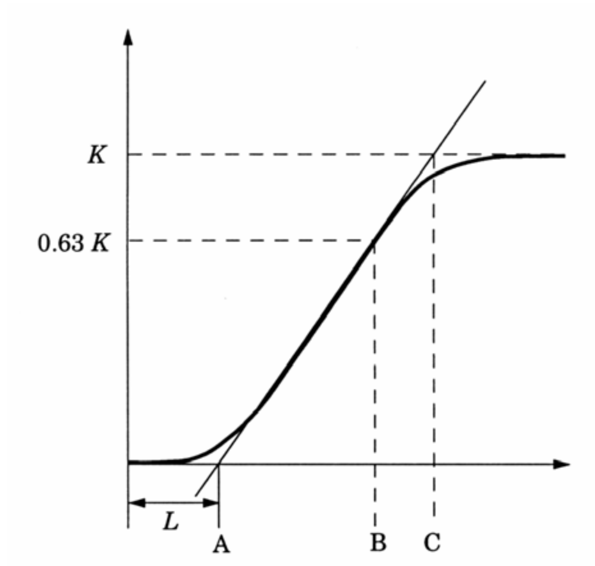
1 . Apparent dead time
2 . Apparent time constant

که در محدودة $0 \le \tau \le 1$ قرار دارد، *زمان مردة نرماليزه*[1] ناميده مي‌شود. از اين کميت مي‌توان براي توصيف مشکل کنترل کردن يك فرايند استفاده کرد. اين کميت گاهي اوقات *نسبت کنترل پذيري*[2] نيز خوانده مي‌شود. صرفنظر از جزئيات، اين نتيجه حاصل شده است که کنترل فرايندهايي که در آنها τ کوچك است ساده بوده و مشکل کنترل کردن سيستم با افزايش τ افزايش مي‌يابد. سيستم‌هايي که در آنها τ =۱ است، متناظر با فرايندهاي زمان مردة خالص بوده و کنترل خوب آنها حقيقتاً مشکل است.

پارامترهاي مدل (۲-۸) را مي‌توان به طور ترسيمي تعيين کرد. بهرة ايستا (K) از سطح نهايي حالت ماندگار خروجي فرايند به دست مي‌آيد. به ياد آوريد که خروجي فرايند بايد با تغيير در متغير کنترل، مقياس شود. تقاطع مماس داراي بيشترين شيب بر پاسخ پله با محور افقي، L را نتيجه مي‌دهد (شکل۲-۸ را ببينيد). زمان مردة L را مي‌توان به‌صورت زمان بين آغاز پله و زماني که $s(t)$ به درصد کمي از مقدار نهايي خود رسيده است نيز به دست آورد. روش‌هاي مختلفي براي تعيين T وجود دارد.

يك روش، T را از فاصله AC در شکل۲-۸ که نقطة C زمان تلاقي خط مماس با خط $s(t)=K$ است تعيين مي‌کند. در روشی ديگر، T از فاصلة AB در شکل۲-۸ که B زمان رسيدن پاسخ پله به مقدار $0/63K$ است تعيين مي‌شود. اگر ديناميك فرايند توسط معادلة (۲-۸) توصيف شود هر دو روش فوق نتايج يکساني مي‌دهند، اما در ساير حالت ممکن است نتايج تفاوت قابل ملاحظه‌اي داشته باشند. معمولاً روشي که بر اساس نقطه B کار مي‌کند تقريب‌هاي بهتري به دست مي‌دهد. روش ديگر منجر مي‌شود به اينکه مقداري بيش از حد بزرگ براي T به دست آيد.

1 . Normalized dead time
2 . Controllability ratio



شکل ۲-۸ تعیین مدل‌هاي سه پارامتري به روش ترسیمي براي سیستم‌هاي با پاسخ پله یکنوا.

مثال ۲-۲

مدل‌هاي سه پارامتري مدل فرایند (۲-۷) به‌صورت زیر هستند:

$$G_{۳a}(s)=\frac{۱}{۱+۶/۷s}e^{-۴/۳s}$$

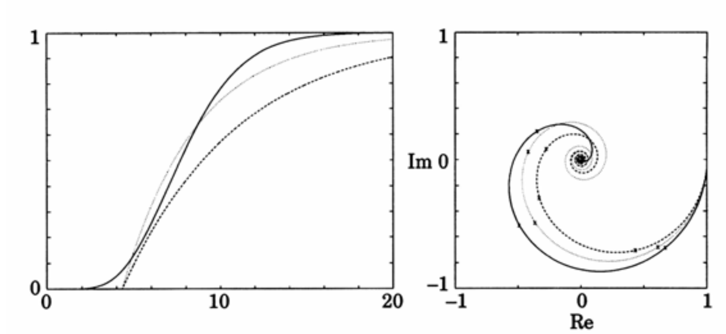
$$G_{۳b}(s)=\frac{۱}{۱+۴/۳s}e^{-۴/۳s}$$

که ثابت زماني T در مدل $G_{۳a}$ از نقطه C و در مدل $G_{۳b}$ از نقطهٔ B تعیین مـي‌شـود. شکل۲-۹ پاسخ‌هاي پله فرایند واقعي و مدل‌ها را همراه با منحني‌هاي نایکوییست توابع

تبديل نشان مي‌دهد. اين شكل نشان مي‌دهد كه ثابت زماني T در مدل G_{3a}، فوق تخمين زده مي‌شود. متأسفانه اين فوق تخمين در اين روش متداول است، زيرا اكثر دستگاه‌هاي كنترل فرايد، مشابه مدل (۲-۷) پاسخ پله S شكل دارند. توجه كنيد كه پاسخ پله واقعي و پاسخ پله مدل G_{3b} در نقطه۶۳٪ منطبق مي‌شوند.

يك ساختار مدل ديگر

مدل(۲-۸) به مراتب در مقالات تنظيم كنترلگر PID بيشتر مورد استفاده قرار گرفته است. علي رغم اين مطلب، اين مدل، يك مدل نماينده نيست. در حقيقت، نتايج گرفته شده بر اساس اين مدل اغلب ممكن است هنگام اعمال آن به فرايندهاي حقيقي، گمراه كننده باشد. اين موضوع با مثال‌هاي متعدد در فصل۴ توضيح داده خواهد شد. يك دليل اين امر آن است كه پاسخ پله مدل(۲-۸) به‌صورت S شكل نيست و يا بطور معادل پاسخ فركانسي مدل براي فركانس‌هاي بالا با سرعت كافي تضعيف نمي‌شود.



شكل ۲-۹ پاسخ‌هاي پله و منحني‌هاي نايكوييست فرايند $G(s) = 1/(s+1)^8$ (خط پر) و مدل‌هاي سه پارامتري

G_{3a} (نقطه چين) و $G_{3b}(s)$ (خط چين).

يك مدل سه پارامتري ديگر به‌صورت زير است:

$$G(s) = \frac{K}{(1+sT)^2} e^{-sL} \qquad (۲-۱۰)$$

پاسخ پله اين مدل به شكل زير است:

$$s(t) = K\left(1-\left(1+\frac{t-L}{T}\right)e^{-(t-L)/T}\right) \qquad (۲-۱۱)$$

اين مدل داراي پاسخ پله S شكل بوده و اغلب تقريب بهتري نسبت به مدل مرتبه اول به علاوة زمان مردة (۲-۸) به دست مي‌دهد. بهرة ايستاي K و زمـان مـردة L بـه همان روش مورد استفاده براي مدل (۲-۸) قابل تعيين هستند. اگر مقدار پاسخ پله در يك زمان، معلوم باشد ثابت T را مي‌توان از معادلة (۲-۱۱) تعيين كرد. معادلـة حاصـل بايد به‌صورت عددي حل شود.

مثال ۲-۳

برازش مدل (۲-۱۰) به فرايند مدل (۲-۷) نتيجه زير را مي‌دهد:

$$G_{3a}(s) = \frac{1}{(1+2s)^2} e^{-4.3s}$$

بهرة $K=1$ از مقدار حالت ماندگار سيگنال و زمان مردة $L = 4.3$ مانند مثال‌هاي قبل از تقاطع خط مماس داراي بيشترين شيب و محور افقي به دست مي‌آيد. دو ثابت زماني $T=2$ از حل عددي معادلة (۲-۱۱) حاصل مي‌شوند. نقطة $s(8.6) = 0.63$ براي به دست آوردن شرايط اضافي به كار مي‌رود. شكل ۲-۱۰ پاسخ‌هاي پله مدل فرايند