مقدمه ای بر کنترل مدرن

www.ketab.ir

تألیف:

دکتر حمید رضا تقی راد

شماره ۴۴۲

سرشناسه: تقی‌راد، حمیدرضا،۱۳۴۵ -
عنوان و نام پدیدآور: مقدّمه‌ای بر کنترل مدرن/ تألیف حمیدرضا تقی‌راد.
وضعیت ویراست: [ویراست ۴].
مشخّصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدّین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۶.
مشخّصات ظاهری: ۵۲۹ ص.: مصور،جدول، نمودار.
شابک: 978-600-7867-56-3
وضعیّت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: واژه‌نامه.
یادداشت: نمایه.
موضوع: سیستم‌های کنترل خطّی -- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع: Linear Control Systems -- Study and Teachi... (Hi...er)
موضوع: مهندسی برق
موضوع: Electri...al Engineering
موضوع: نظریّه کنترل
موضوع: Control Theory
رده بندی کنگره: ۱۳۹۶ ۷م۷ت/۰...
رده بندی دیویی: ۶۲۹/۸۳۲۰۷
شماره کتابشناسی ملّی: ۴۸۹۱۶۰۲

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین ...وسی http://press.kntu.ac.ir

عنوان: مقدّمه‌ای بر کنترل مدرن
مؤلّف: دکتر حمید رضا تقی راد
ویرایش: چهارم
نوبت چاپ: اوّل
تاریخ انتشار: آبان ۱۳۹۶، تهران
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
چاپ: شریف
صحّافی: گرنامی
قیمت: ۳۷۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی- پلاک ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - پلاک ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): www.press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

پیشگفتار

در این کتاب روش‌های تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل خطی با نگرش مدرن ارائه شده است. این کتاب به عنوان مرجعی مناسب برای دانشجویان سال چهارم کارشناسی گرایش کنترل در مهندسی برق و یا سال اوّل کارشناسی ارشد گرایش‌های مختلف مهندسی برق، مهندسی مکانیک و مهندسی فرآیندها پیشنهاد می شود. پیش‌نیاز لازم برای بهره‌برداری مناسب از مطالب این کتاب، درس‌های فیزیک مکانیک، فیزیک الکتریسیته، معادلات دیفرانسیل، مدارهای الکتریکی، جبر خطی و سیستم‌های کنترل خطی است. تحلیل سیستم‌های کنترل خطی و طراحی کنترل‌کننده مناسب برای آنها، بر پایه اصول ریاضی محکمی بنا شده است و در کاربردهای مختلف مهندسی مورد استفاده واقع می شود از این رو در تدوین این کتاب، علاوه بر ارائه دقیق ریاضیات لازم، روند کاربردی روش‌ها با ارائه مثال‌های متنوع صنعتی در متن کتاب و مسائل آن دنبال شده است. بخشی از مطالب این کتاب مستقیماً تألیف و بخشهای دیگر ترجمه، ترکیب و تلخیص مراجع مختلف به رشته تحریر در آمده است. موضوع این نگارش بیش از پانزده سال به صورت مستمر در درس کنترل مدرن دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ارائه شده و تجربیات حاصل متناسب با نیاز برازش شده است. این کتاب توسط همکاران متعددی نیز در دانشگاه‌های دیگر کشور مورد تدریس قرار گرفته است و بازخورد نظرات این عزیزان نیز در این نسخه مورد استفاده قرار گرفته است.

این کتاب به شرح زیر تدوین شده است. در فصل اوّل ضرورت و اهداف سیستم‌های کنترل معرفی شده و با ارائه مثال‌های مختلف صنعتی و اجتماعی نیاز مبرم به استفاده از سیستم‌های کنترل تشریح گشته است. سپس عوامل اصلی سیستم‌های کنترل در قالب اجزای فیزیکی و مفهومی در این گونه سیستم‌ها معرفی شده و روش-های طراحی عمومی سیستم‌های کنترل بیان شده است. با توجه به نحوه نگرش طراحی به این مسائل، روشهای طراحی به دو دسته کلاسیک و مدرن تقسیم شده اند. در پایان نحوه ارائه روش مدرن طراحی کنترل کننده به صورت خلاصه معرفی گشته است. در فصل دوم با توجه به نیاز خواننده به مفاهیم ریاضیات پایه، مروری بر جبر خطی آورده شده است. این فصل جایگزین درس جبر خطی نبوده بلکه تنها موارد اصلی این حوزه که در روش های تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل مدرن مورد نیاز می باشد، یادآوری شده است.

در فصل سوم با عنایت به اینکه اولین مرحله در طراحی کنترل کننده، شناخت سیستم یا فرآیند می باشد، با استفاده از قوانین و اصول فیزیکی حاکم بر سیستم‌های الکتریکی، الکترومکانیکی، مکانیکی و هیدرولیکی دسته قابل توجهی از سیستم‌های صنعتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل آنها به فرم فضای حالت بدست آورده شده‌است. فرم فضای حالت با بهره گیری از متغیر حالت مبنای اصلی روش‌های مدرن تحلیل و طراحی در سیستم‌های کنترل می باشد. با توجه به ویژگی متغیر حالت در فشرده سازی اطلاعات، اهمیت استفاده از آن در

www.ketab.ir

مدل‌سازی سیستم‌های خطی بیان شده است. در پایان این فصل مثال‌هایی از سیستم‌های مهم حرارتی، شیمیایی و الکترومغناطیسی در بخش مسائل این فصل معرفی می‌شوند و با ارائه اصول فیزیکی حاکم، به مدل-سازی آنها خواهیم پرداخت. برای مدل‌سازی سیستم‌های مکانیکی روش لاگرانژ که مبتنی بر معادلات انرژی در این گونه سیستم‌ها است به عنوان روشی مؤثر معرفی شده است. همچنین روش عمومی خطی سازی سیستم های غیر خطی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در پایان این فصل با اشاره به این موضوع که کلیه مدل‌های بدست آمده تنها تقریبی غیر دقیق از سیستم واقعی می باشند، که ارتباط بین ورودی و خروجی را به فرم معادلات دیفرانسیل مشخص می سازند، توجه خواننده را به نامعینی در مدل‌سازی معطوف ساخته و انواع نامعینی‌های مدل‌سازی معرفی شده اند.

در فصل چهار با هدف بدست آوردن پاسخ سیستم‌های خطی در اثر شرایط اولیه و ورودی معین، ویژگی‌های سیستم‌های خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین ترتیب پاسخ سیستم به دو بخش بدون ورودی و بدون شرایط اولیه تجزیه شده است و با توجه به اصل رویهم‌گذاری سیستم‌های خطی، پاسخ کامل سیستم با تعیین این دو جزء به صورت مستقل بدست آمده است. در این راستا ماتریس تبدیل حالت سیستم تعریف شده است. این نمایش نه تنها پاسخ کلیه سیستم‌های خطی را به صورت عمومی تعیین می کند، اهمیت بردار متغیر حالت را در فشرده سازی اطلاعات ورودی بر خود نشان می دهد. در ادامه، خصوصیات اصلی ماتریس انتقال حالت و مشابهت آن با توابع نمائی نشان داده شده است و روشهای مختلف تعیین تحلیلی و عددی آن بررسی شده اند. در پایان این فصل نیز روش‌های نمایش سیستم به صورت غیر مزدوج یا قطری را که در تسریع عملیات عددی سیستم‌ها حایز اهمیت است، با معرفی تبدیل نمایی تشریح نموده و در حالت عمومی فرم بلوکی-جردن بدست آمده است.

در فصل پنجم مفاهیم کنترل پذیری، رویت پذیری، پایدار پذیری و آشکار پذیری تشریح شده اند. اپراتور کنترل پذیری در واقع به عنوان نگاشتی بین توابع بی نهایت بعدی ورودی و متغیر حالت n بعدی، فشرده سازی اطلاعات ورودی به مقدار اولیه متغیر حالت را به عهده داشته و در صورتی که رتبه این نگاشت کامل باشد سیستم کنترل پذیر نامیده می شود. به صورت دوگان، اپراتور رویت پذیری به عنوان نگاشتی خطی بین متغیر حالت n بعدی و خروجی بی نهایت بعدی سیستم، عمل کرده و خاصیت رویت پذیری در واقع تعداد و چیدمان سنسورهای لازم را به منظور تعیین وضعیت سیستم در بر می گیرد. این دو ویژگی قبل از طراحی هر نوع کنترل کننده مدرن برای سیستم‌های خطی بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. با استفاده از تعاریف و قضایای مربوط به این ویژگی‌های، روشهای تحلیل کنترل پذیری و رویت پذیری در سیستم‌های خطی ارائه شده و ارتباط آن با وجود مودهای پنهان یا حذف صفر و قطب در نمایش ماتریس تبدیل سیستم به بحث کشیده شده است. در انتها با ارائه روشهای تجزیه سیستم به مودهای کنترل پذیر، رویت پذیر، کنترل ناپذیر و رویت ناپذیر نحوه تفکیک اجزاء سیستم به فرم کالمن تشریح شده است.

در فصل ششم با روش‌های تحقق سیستم‌های خطی و روش‌های تحلیل پایداری آنها آشنا می شویم. تحقق سیستم به معنای نمایش یک سیستم به فرم فضای حالت در صورت معین بودن فرم ماتریس تبدیل آن می باشد. از آنجایی که بر خلاف نمایش ماتریس تبدیل، فرم فضای حالت سیستم یکتا نمی باشد، تحقق های

www.ketab.ir

بسیاری برای یک ماتریس تبدیل قابل بیان است. از آن جمله تحقق های کنترل پذیری، رویت پذیری، رویت-گر، کنترل‌گر و تحقق جردن می باشند که در این فصل تشریح شده اند، و به خصوصیات اصلی آنها اشاره شده است. فرم جامع تحقق در حالت چند ورودی- چند خروجی نیز در نهایت تشریح شده است.

تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل شرط اولیه و مهم در طراحی هر نوع سیستم کنترلی می باشد. این مهم توسط قضایای مبسوط پایداری که در فصل ششم ارائه شده است، بررسی شده است. در ابتدا تعاریف پایداری سیستم‌های غیر خطی و خطی را طرف توجه قرار داده ایم و پس از ارائه قضیه مهم لیاپانوف در تحلیل پایداری سیستم‌های غیر خطی قضایای نتیجه شده برای سیستم‌های خطی ارائه شده است. پایداری داخلی که مهم‌ترین نوع پایداری سیست های خطی می باشد، در انتها مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته است.

در فصل هفتم ا ول طراحی فیدبک حالت با دو روش جایابی قطب و کنترل بهینه LQR ارائه شده است. در این فصل ابتدا اهداف عمومی طراحی کنترلر برای سیستم‌های صنعتی را بر شمرده، و حفظ پایداری سیستم به علاوه مسئله تنظیم و یا تعقیب به صورت دقیق تعریف شده است. همچنین نشان داده شده است که مسئله تعقیب با تعمیم روش تنظیم قابل حل است لذا در ادامه، حل مسئله تنظیم توسط دو روش جایابی قطب و کنترلر بهینه LQR ارائه شده است و الگوریتم های مختلف حل عددی این مسائل نیز تشریح شده اند. در پایان این فصل به منظور بررسی روشهای رفع اغتشاش ثابت و متغیر در سیستم‌های کنترل به تعمیم روش فوق و اضافه نمودن ترم پیش خور رفع اغتشاش و همچنین فیدبک انتگرال حالت پرداخته شده است.

روش مدرن کنترل سیستم‌های صنعتی مبتنی بر فیدبک حالت می باشد. این در حالی است که معمولاً در این سیستم‌ها کلیه حالت‌های سیستم در دسترس نبوده و تنها خروجی‌های خاصی از سیستم مورد اندازه گیری واقع می شوند. در فصل هشتم ایده تخمین متغیرهای حالت با استفاده از خروجی‌های سیستم بسط داده شده است. رویتگر حالت به عنوان یک سیستم دینامیکی که مبتنی بر مشخصات سیستم و اطلاعات خروجی تشکیل می شود، نیاز طراح را به اندازه گیری کلیه متغیرهای حالت مرتفع می سازد. متغیرهای تخمین زده شده را در حلقه فیدبک استفاده می نماید. علی رغم اینکه رویت گر حالت بدین منظور در ادبیات کنترل مدرن معرفی شده است، به خاطر ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مورد استقبال و استفاده در بسیاری از کاربردهای دیگری که به نوعی پالایش یا پیش‌بینی مورد نیاز است، قرار گرفته است. خوشبختانه حل مسئله رویتگر حالت دوگان حل مسئله فیدبک حالت بوده، و کلیه روشهای تشریح شده در تعیین بهره فیدبک حالت، به صورت متناظر در حل مسئله رویتگر حالت نیز مورد استفاده قرار می گیرد. بدین ترتیب روشهای جایابی قطب و رویتگر بهینه فیدبک حالت که به فیلتر کالمن مشهور است تشریح شده اند. در ادامه این فصل رویتگرهای با کاهش مرتبه یا لوئنبرگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. و در پایان با ترکیب رویت‌گر حالت و فیدبک حالت ویژگی‌های استفاده از متغیر حالت تخمین زده شده در حلقه فیدبک بررسی شده است.

در کلیه بخش‌ها با ارائه مثالهای صنعتی نحوه عملی تنظیم کننده فیدبک حالت و بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری محقق شده است و با ارائه مثالهای صنعتی همانند فصول قبل، نحوه تنظیم پارامترهای کنترل کننده و رویت گر و همچنین بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته صورت پذیرفته است.

www.ketab.ir

در ویرایش حاضر این کتاب برنامه های مقدماتی و حرفه ای طراحی کنترل کننده ها و رویتگرهای مدرن و شبیه سازی سیستم های خطی و غیرخطی در نرم افزار Matlab تدوین شده است.

با توجه به ساختار تدوین شده در این کتاب پیش بینی می‌شود دو طیف از مخاطبین علاقه مند به استفاده از این کتاب شوند. از یک طرف این کتاب به عنوان مرجع درسی دانشگاهی می‌تواند مورد استفاده دانشجویان مقطع کارشناسی و یا کارشناسی ارشد قرار گیرد. هرچند این کتاب نیاز به کتاب‌هایی که در بخش مراجع معرفی شده‌اند را مرتفع نمی‌سازد، امّا می‌تواند به عنوان راهنمای کاملی مورد استفاده دانشجویان و اساتید ارجمند قرار گیرد. طیف دیگر از مخاطبین این کتاب را کارشناسان محترمی تشکیل می دهند که در صنایع کشور مشغول به فعالیت بوده و علاقه‌مند به استفاده از روش‌های طراحی کنترل مدرن در کاربردهای مورد نظر خود می‌باشند. به منظور استفاده این عزیزان سعی شده است کلیه روش‌ها با مثال‌های صنعتی و برنامه های آماده شده تعقیب شود و امیدوارم این کتاب به عنوان یک مرجع فارسی مناسب در این زمینه راهگشای متخصصین باشد.

این کتاب توسط همکاران و دانشجویان زیادی مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفته است. علیرغم تلاش فراوان نسبت به تصحیح اشکالات، قطعاً همچنان اشکالات دیگری در آن وجود دارد، که باعث خوشحالی اینجانب خواهد شد اگر این موارد به صورت الکترونیکی به آدرس taghirad@kntu.ac.ir گزارش شود. همچنین کلیه برنامه‌های مورد استفاده در این کتاب و موارد اصلاحی مورد اشاره در وب‌گاه کتاب به آدرس:

http://aras.kntu.ac.ir/publications/Modern_Control_Book

به روز رسانی خواهد شد. دانشجویان و متخصصین محترم می‌توانند با مراجعه به این پایگاه از کدهای نوشته شده در این کتاب بهره برداری نموده و ضمن فراگیری موضوعات درس امکان تمرین بیشتری را داشته باشند. همچنین سوالات تکمیلی حل شده و اضافی در سایت درس به روز رسانی خواهد شد. کارشناسان صنایع نیز می‌توانند با استفاده از الگوی ارائه شده در این برنامه‌ها، با استفاده از ساختار آن و تغییر در جزئیات، به طراحی و تحلیل کنترل‌کننده‌های مناسب در کاربرد خود بپردازند.

در پایان از کلیه کسانی که در تدوین کتاب و انجام اصلاحات لازم مرا یاری نموده اند به خصوص دکتر علی خاکی صدیق، دکتر سجاد ازگلی، دکتر محمد اعظم خسروی، دکتر علیرضا نوروزی، دکتر داوری، مهندس صمیم خسروی، مهندس بیتا فلاحی، مهندس کیوان محمدی مهندس پدرام آگند و به ویژه سرکار خانم مهندس زهرا مروی و کلیه دانشجویانی که طی سال‌های استفاده از این کتاب نظرات خود را به من اعلام نموده اند و بدون کمک‌های ایشان این نسخه بدین شکل و در این زمان قابل ارائه نمی بود، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است این مجموعه برای دانش‌پژوهان و کارشناسان صنعتی کشور مفید واقع شود.

حمیدرضا تقی راد

مهر ماه ۱۳۹۶

www.ketab.ir

فهرست

پیشگفتار ..... أ

فهرست ..... ج

ماتریس ردیابی مسائل ..... ر

۱ مقدمه ۱

۱.۱ پیشگفتار ۱

۲.۱ عناصر فیزیکی سیستم‌های کنترل ۳

۳.۱ عناصر مفهومی سیستم‌های کنترل ۴

۴.۱ فرآیند طراحی کنترل ۵

۵.۱ جمع بندی ۸

منابع و مراجع ۹

۲ مروری بر جبرخطی ۱۱

۱.۲ تعاریف ۱۱

۱.۱.۲ مزدوج و ترانهاده یک ماتریس ۱۲

۲.۱.۲ ماتریس ترانهاده مزدوج ۱۲

۳.۱.۲ ماتریس‌های متعامد ۱۴

۴.۱.۲ ماتریس واحدی ۱۵

۵.۱.۲ ماتریس نرمال ۱۶

۶.۱.۲ جمع بندی ۱۶

۲.۲ دترمینان ماتریس ها ۱۷

۱.۲.۲ تعیین دترمینان یک ماتریس ۱۷

۲.۲.۲ خواص دترمینان ها ۱۷

۳.۲ وارون ماتریس ها ۱۸

۱.۳.۲ ماتریس‌های ویژه و ناویژه ۱۸

۲.۳.۲ خواص وارون ماتریس ۱۹

۴.۲ مقدار و بردار ویژه یک ماتریس ۲۰

۵.۲ قواعد عملیات ماتریسی ۲۱

۱.۵.۲ ضرب یک ماتریس در عدد ۲۱

۲.۵.۲ ضرب دو ماتریس ۲۱

www.ketab.ir

۳.۵.۲ مشتق گیری از ماتریس ها ۲۱
۴.۵.۲ مشتق گیری یک تابع اسکالر نسبت به یک بردار ۲۲
۵.۵.۲ ژاکوبین ۲۳
منابع و مراجع ۲۴

۳ نمایش سیستم های خطی ۲۵
۱.۳ مقدمه ۲۵
۲.۳ نمایش فضای حالت ۲۵
۳.۳ مدل‌سازی سیستم بر اساس اصول فیزیکی ۲۹
۱.۱.۳ سیستم‌های الکتریکی ۲۹
۲.۱.۳ سیستم‌های الکترومکانیکی ۳۰
۳.۳.۳ سیستم‌های مکانیکی ۳۵
۴.۳.۳ سیستم‌های هیدرولیکی ۴۲
۴.۳ مدل‌سازی بر اساس روش لاگرانژ ۴۵
۵.۳ خطی سازی ریاضی ۵۴
۶.۳ نامعینی مدل ۶۰
۷.۳ جمع بندی ۶۱
۸.۳ مسائل ۶۲
۹.۳ مسائل حل شده ۸۴
منابع و مراجع ۱۲۲

۴ نظریه سیستم‌های خطی ۱۲۳
۱.۴ مقدمه ۱۲۳
۲.۴ ویژگی‌های سیستم‌های خطی ۱۲۳
۳.۴ حل معادلات حالت سیستم‌های LTI ۱۲۵
۱.۳.۴ پاسخ همگن یا بدون ورودی و ماتریس انتقال حالت ۱۲۵
۲.۳.۴ پاسخ کامل معادلات حالت ۱۲۷
۴.۴ روشهای تعیین ماتریس انتقال حالت ۱۳۱
۱.۴.۴ روش تبدیل لاپلاس ۱۳۱
۲.۴.۴ مودهای دینامیکی ۱۳۲
۳.۴.۴ روش کیلی-همیلتون ۱۳۶
۴.۴.۴ روش سیلوستر ۱۴۱
۵.۴ ماتریس تبدیل سیستم‌های خطی ۱۴۶
۶.۴ قطب ها و صفرهای انتقال ۱۴۸

www.ketab.ir

۷.۴ تبدیلهای همانندی ۱۵۱
۸.۴ قطری سازی معادلات حالت (فرم جردن) ۱۵۳
۱.۸.۴ فرم قطری ماتریس ۱۵۳
۲.۸.۴ تبدیل ماتریس سیستم با مقادیر ویژه مختلط ۱۵۵
۳.۸.۴ فرم عمومی بلوکی- قطری جردن ۱۵۷
۹.۴ جمع بندی ۱۶۳
۱۰.۴ مسائل ۱۶۳
۱۱.۴ مسائل حل شده ۱۷۴
منابع و مراجع ۲۰۷

۵ رویت پذیری و کنترل پذیری ۲۰۹
۱.۵ رویت پذیری ۲۰۹
۱.۱.۵ مقدمه ۲۰۹
۲.۱.۵ تعریف رویت‌پذیری ۲۱۰
۳.۱.۵ آزمون‌های رویت پذیری ۲۱۳
۴.۱.۵ زیر فضای رویت‌ناپذیر ۲۱۹
۵.۱.۵ آشکارپذیری ۲۲۲
۲.۵ کنترل‌پذیری ۲۲۳
۱.۲.۵ تعریف کنترل پذیری ۲۲۳
۲.۲.۵ حالتهای کنترل ناپذیر و کنترل پذیری ۲۲۴
۳.۲.۵ آزمون‌های کنترل پذیری ۲۲۴
۴.۲.۵ پایدارپذیری ۲۲۶
۵.۲.۵ زیر فضای کنترل پذیر ۲۲۶
۳.۵ تجزیه کالمن سیستمهای LTI ۲۲۷
۴.۵ جمع بندی ۲۳۰
۵.۵ مسائل ۲۳۱
۶.۵ مسائل حل شده ۲۴۱
منابع و مراجع ۲۵۸

۶ تحقق و پایداری سیستم‌های خطی غیر متغیر با زمان ۲۵۹
۱.۶ تحقق سیستم‌های خطی غیر متغیر با زمان ۲۵۹
۲.۶ تحقق کاهش ناپذیر ۲۶۰
۳.۶ تحقق سیستم‌های تک ورودی- تک خروجی ۲۶۳
۱.۳.۶ تحقق کانونی کنترل کننده ۲۶۴

www.ketab.ir

۲.۳.۶ تحقق کانونی رویت کننده ۲۶۵
۳.۳.۶ تحقق کانونی رویت پذیری ۲۶۶
۴.۳.۶ تحقق کانونی کنترل پذیری ۲۶۷
۵.۳.۶ تحقق کانونی جردن ۲۷۰
۴.۶ تحقق سیستم‌های یک ورودی- چند خروجی ۲۷۲
۵.۶ تحقق سیستم‌های چند ورودی- تک خروجی ۲۷۴
۶.۶ تحقق سیستم‌های چند ورودی و چند خروجی ۲۷۵
۷.۶ پایداری سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان ۲۷۹
۱.۷.۶ تعاریف پایداری ۲۷۹
۲.۷.۶ قضایای پایداری سیستم‌های خطی غیر متغیر با زمان ۲۸۱
۳.۷.۶ قضیه پایداری لیاپانوف و تحلیل پایداری سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان ۲۸۳
۸.۶ جمع بندی ۲۸۶
۹.۶ مسائل ۲۸۷
۱۰.۶ مسائل حل شده ۲۹۴
منابع و مراجع ۳۲۳

۷ فیدبک حالت ۳۲۵
۱.۷ مقدمه ۳۲۵
۲.۷ ویژگی های فیدبک حالت ۳۲۵
۳.۷ طراحی کنترل کننده فیدبک حالت: جایابی قطب ۳۳۱
۱.۳.۷ روش مستقیم برای تعیین ماتریس بهره فیدبک حالت ۳۳۴
۲.۳.۷ روش بس و گیورا ۳۴۰
۳.۳.۷ روش تبدیل همانندی ۳۴۲
۴.۳.۷ فرمول آکرمن ۳۴۳
۵.۳.۷ روش مِین- مِرداخ ۳۴۵
۴.۷ جایابی قطب در سیستم های چند ورودی ۳۴۷
۱.۴.۷ روش نگاشتی ۳۴۸
۲.۴.۷ روش طیفی ۳۵۱
۵.۷ کنترل فیدبک حالت بهینه ۳۵۲
۱.۵.۷ مقدمه ۳۵۲
۲.۵.۷ معادله ماتریسی لیاپانوف ۳۵۴
۳.۵.۷ طراحی کنترل کننده LQR ۳۵۸
۴.۵.۷ انتخاب مناسب ماتریسهای وزنی ۳۶۶
۶.۷ رفع اغتشاش و ورودی مرجع ۳۶۹

www.ketab.ir

۷.۷ فیدبک انتگرال حالت ۳۸۲
۸.۷ جمع بندی ۳۸۷
۹.۷ مسائل ۳۸۸
۱۰.۷ مسائل حل شده ۴۰۶
منابع و مراجع ۴۳۹

۸ رویتگر حالت ۴۴۱
۱.۸ مقدمه ۴۴۱
۲.۸ یک رویتگر مقدماتی ۴۴۱
۳.۸ رویتگر مدل– کامل ۴۴۲
۴.۸ رویتگر حالت بهینه (فیلتر کالمن) ۴۴۸
۱.۴.۸ طراحی رویتگر بهینه ۴۴۸
۲.۴.۸ فیلتر کالمن: نظرهای موفق در کاربردهای مختلف ۴۵۰
۵.۸ رویتگر لوئنبرگر ۴۵۵
۶.۸ سیستم حلقه بسته فیدبک حالت - رویتگر حالت ۴۵۸
۷.۸ سیستم حلقه بسته فیدبک حالت - رویتگر حالت با اغتشاش ثابت نامعین ۴۶۶
۸.۸ جمع بندی ۴۶۸
۹.۸ مسائل ۴۶۹
۱۰.۸ مسائل حل شده ۴۸۲
منابع و مراجع ۴۹۸

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۴۹۹

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۵۰۳

فهرست راهنما ۵۰۷

www.ketab.ir

۱ مقدمه

۱.۱ پیشگفتار

مهندسان کنترل غالباً به دنبال طراحی سیستمی هستند که رفتار خروجی سیستم به صورت خودکار از رفتار مطلوبی پیروی کند. در بسیاری از سیستم‌ها و فرآیندهای صنعتی خروجی سیستم می‌بایست بر روی مقدار مطلوب ثابتی تنظیم شود. مثال‌هایی نظیر کنترل درجه حرارت یک اتاق، ثابت نگهداشتن فرکانس برق تولیدی در یک نیروگاه، کنترل ضخامت کاغذ تولیدی در یک کارخانه مطابق استاندارد و تنظیم درجه حرارت بدن انسان بر روی مقدار مطلوب ۳۷ درجه نمونه هایی از این نوع کاربرد می‌باشند. این هدف کنترلی را *تنظیم*[1] و سیستم‌های کنترلی که این هدف را پیگیری می‌نمایند، تنظیم‌کننده می‌نامند. از سوی دیگر در برخی دیگر از کاربردهای کنترلی خروجی سیستم می‌بایست رفتار مطلوب تابعی از زمان را ردیابی نماید. مثال‌هایی نظیر یک رادار ردیاب، جستجوگر یک هواپیما، کنترل ترجیح سرعت خاص در یک کوره در فرآیند تنش زدایی فولاد و یا کنترل حرکت یک بازوی رباتیک از این دسته می‌باشند. این هدف کنترلی را *ردیابی*[2] می‌نامند. روشن است که رسیدن به اهداف ردیابی نسبت به اهداف تنظیم چالش برانگیزتر است، چرا که رفتار مطلوب خروجی سیستم در حالت ردیابی با زمان تغییر می‌کند. اما به لحاظ ریاضی تعریف متغیر خطا بر مبنای اختلاف مقدار واقعی خروجی از مقدار مطلوب، و هدف قرار دادن کاهش خطا تا حد ممکن می‌توان این دو هدف را به فرم ریاضی به صورت مشابهی تعبیر نمود [۵].

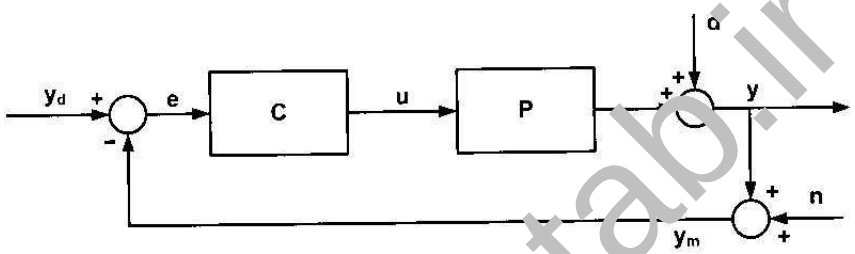
با اینکه عمومی‌ترین و مهمترین هدفی که در سیستم‌های کنترل خودکار دنبال می‌شود تنظیم یا ردیابی است، اما این هدف بایستی در کنار اهداف مهم دیگری تعقیب گردد. پایداری سیستم کنترلی یکی دیگر از اهداف مهم به شمار می‌رود. در صورتی که پایداری یک سیستم کنترل تضعیف شود اندازه خروجی‌های سیستم یا متغیرهای تاثیر گذار دیگر در سیستم به شدت رشد خواهد نمود و طبیعی است که در این حالت رسیدن به ردیابی مناسب امکان پذیر نخواهد بود. پایداری در سیستهای کنترلی از ردیابی نیز مهم‌تر است و به‌عنوان شرط لازم در طراحی مد نظر قرار می گیرد. چرا که ناپایداری تهدیدی برای سلامت سیستم و کاربرانی که با آن در تعاملند محسوب می‌شود.

در کنار اهداف پایداری و ردیابی در سیستم‌ها، اهداف دیگری نیز مد نظر قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه در بسیاری از سیستم‌های کنترلی از ساختار پسخور واحد مطابق شکل ۱-۱ استفاده می‌شود، و این ساختار مبنای طراحی کنترل در این کتاب نیز می‌باشد، در ابتدا اهمیت این ساختار را برای رسیدن به اهداف چندگانه در

[1] Regulation
[2] Tracking

www.ketab.ir

سیستم‌های کنترلی ارزیابی می‌نماییم. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، در حالت کلی سیگنال خروجی سیستم $y(t)$ می‌بایست ورودی مطلوب در سیستم را ردیابی نماید. این ردیابی توسط سیگنال خطا که به صورت $e(t) = y_d(t) - y(t)$ تعریف می‌شود قابل توصیف بوده، که در هر دو حالت تنظیم یا ردیابی، سیگنال خطا بایستی کوچک گردد. اما در سیستم‌های واقعی مشکلات و محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد. اغتشاش $d(t)$ از دیگر ورودی‌هایی است که به سیستم وارد شده و اغلب کارایی سیستم کنترل را تهدید می‌نماید. از طرف دیگر هیچگاه اندازه‌گیری خروجی سیستم بی‌نقص نبوده و نویز اندازه‌گیری $n(t)$ مشاهده خروجی‌های سیستم را دچار اختلال می‌نماید. محدودیت دیگر در سیستم معمولا در اعمال فرمان‌های کنترلی $u(t)$ بروز می نماید. این فرمان‌ها می‌بایست توسط محرک‌های سیستم اجرا شوند و محرک‌ها غالباً از لحاظ اشباع دامنه و پهنای باند دارای محدودیت می‌باشند.



شکل۱-۱: نمودار بلوکی از یک مساله‌ی کنترلی.

خداوند متعال قطعاً علم مهندسی کنترل را کمال به اجا رسانده است. درجه حرارت بدن انسان تقریباً همواره نزدیک ۳۷ درجه سانتیگراد نگهداری می شود. در حالت تعداد زیادی حسگر حرارتی در طول بدن انسان پخش می باشد و مکانیزمهای مختلفی همانند تنفس، عرق کردن، لرزیدن، گردش خون و ... نیز برای کنترل درجه حرارت در بدن انسان طراحی شده است. روش بظاهر ساده ای که بر آن، دست خود را دراز کرده و یک فنجان چای را جابجا می کنیم، راه حل تحسین آمیز مساله بسیار مشکلی در روبات یک درحال حاضر می باشد.

چهار دلیل عمده استفاده از سیستم‌های کنترل را می توان کارایی، مسائل اقتصادی و سودآوری تولید، امنیت کاربر و قابلیت اطمینان نام برد. بسیاری از سیستم‌ها به کارایی مناسب دست خواهند رسید مگر از سیستم کنترل مناسب در آنها استفاده گردد. کارایی مناسب هواپیماهای مسافربری در حمل و نقل انسان و هواپیماهای جنگی در ایجاد مانورهای مختلف مدیون سیستم کنترل آنست دقت کارایی یک روبات توسط سیستم کنترل آن تأمین شده، در کلیه پروسه های تولیدی، نیروگاه ها و پالایشگاه ها، سیستم های کنترل، کیفیت مناسب محصولات را ایجاد می کنند.

مسائل اقتصادی و بهره وری مناسب نیز دلیل عمده دیگر استفاده از سیستم‌های کنترل در صنعت می باشد. این امر بخصوص در فرآیندهای تولیدی بسیار حائز اهمیت است. نیروگاه‌های تولید انرژی، ستون‌های تجزیه پالایشگاه‌ها، دستگاه‌های تولید کاغذ و کلیه فرآیندهای تولیدی پیوسته از جمله مثال‌هایی است که کیفیت و قیمت فرآیند تولید شده بستگی مستقیم به سیستم کنترل آن دارد. سرعت تولید به همراه رسیدن به کیفیت مناسب و ضایعات حداقل، عوامل بسیار مهم اقتصادی است که توسط سیستم‌های اتوماسیون و کنترل قابل

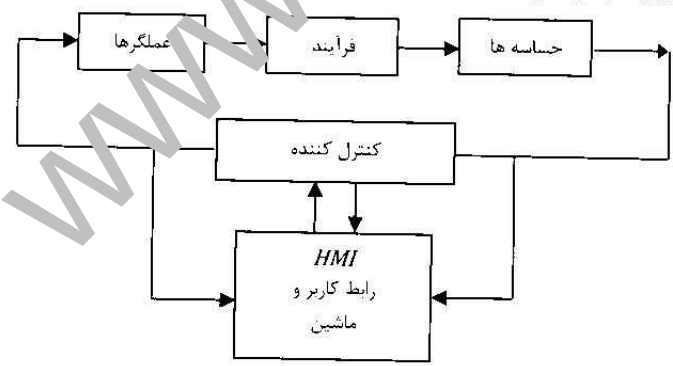
www.ketab.ir

دسترسی است. دقت کنید که تنها درصد کوچکی بهبود کیفیت و کاهش قیمت در محصولی که به صورت پیوسته تولید می شود در بهره‌وری آن نقش بسیار مهمی ایفا می کند. از طرف دیگر افزایش ظرفیت تولید به نسبت سرمایه گذاری انجام شده بهره‌وری دیگر اقتصادی آنست.

امنیت کاربر نیز دلیل دیگر استفاده از سیستم‌های کنترل می باشد. هواپیما تنها توسط سیستم‌های کنترل و امنیتی دقیق قادر به فرود در حداقل دید می باشد. یک نیروگاه هسته ای تنها درصورت وجود سیستم‌های کنترل و امنیتی دقیق قادر به تولید انرژی به صورت کامل ایمن خواهد بود. بسیاری از سیستم‌ها دارای محدوده-های کوچک خطی در عملکرد می باشند که تنها توسط سیستم‌های کنترل به صورت خودکار در محدوده ایمن کار خواهند نمود. مسئله آخر که در اینجا می توان به آن اشاره نمود درجه اطمینان بیشتر در محصولات تولیدی است که توسط سیستم های کنترل تنظیم می شوند. سیستم‌های کنترل تغییرات سریع کمّیت های فیزیکی در سیستم‌های کنترل شده را به حداقل می رسانند، موضوعی که به صورت طبیعی باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می شود.

۲.۱ عناصر فیزیکی سیستم‌های کنترل

شکل زیر عناصر فیزیکی یک سیستم کنترل را به صورت عمومی نشان می دهد. فرآیند[1]، به موضوعی که تحت کنترل قرار گرفته است اطلاق می شود. در این صورت یک هواپیما نیز می تواند فرآیند تحت کنترل نامیده شود. فرآیند دارای متغیرهای خروجی[2] می باشد که برخی از آنها تحت کنترل قرار دارند. معمولا این کمّیت ها توسط حساسه‌ها[3] یا حسگرها اندازه‌گیری می شوند. یک حساسه معمولاً یک مبدل[4] می باشد، که توسط آن کمّیت فیزیکی مورد نظر به صورت تناسبی به کمیت فیزیکی دیگری (معمولاً الکتریکی) تبدیل می شود، تاکومتر، شتاب سنج، ترموکوپل، کرنش سنج و اندازه‌گیر PH از جمله این مبدل ها می باشد.



شکل۱-۲: عناصر فیزیکی سیستم کنترل

[1] Plant
[2] Outputs
[3] Sensors
[4] Transducer

www.ketab.ir

همچنین یک فرآیند دارای متغیرهای ورودی[1] است که با تأثیرگذاری بر روی فرآیند، کمّیت های خروجی را تغییر می دهند. عناصری که متغیرهای ورودی را تولید می کنند، عملگرها[2] نامیده می شوند. عملگرهای هیدرولیکی، نیوماتیکی، انواع موتورهای الکتریکی، منابع ولتاژ متغیر و شیرهای کنترلی از جمله عملگرهای متداول صنعتی می باشند.

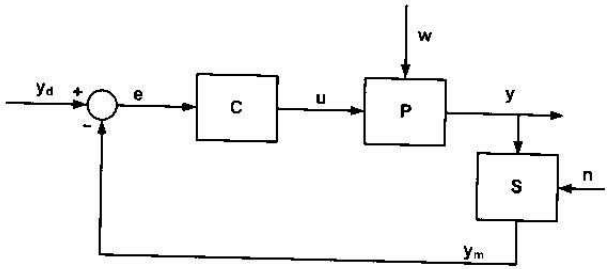
کنترل کننده وظیفه اجرای استراتژی کنترل را برروی فرآیند بر عهده داشته و این عمل را از طریق عملگرها و با دریافت اطلاعات حسگرها انجام می دهد. کنترل کننده ها می توانند آنالوگ و به صورت نیوماتیکی، الکتریکی یا الکترونیکی بوده و یا به صورت دیجیتال و توسط کامپیوتر و پردازشگرهای رقمی پیاده سازی شوند، که در این حالت توسط مبدلهای A/D[3] و D/A[4] به فرآیند متصل می شوند. رابط کاربر و ماشین در واقع پنجره ای است که فرآیند مورد نظر را پایش نموده و اجزاء تنظیم کننده‌های کنترل‌کننده‌ها و همچنین کمیت‌های مورد نظری از فرآیند را که کارایی سیستم را مشخص می نمایند، در اختیار کاربر قرار می دهد. در این واحد، اطلاعات حسگرها و عملگرها پایش شده و کمّیت های مهم و قابل تنظیم کنترل کننده‌ها جهت استفاده و تنظیم کاربر در اختیار او قرار می گیرد. انواع نشانگرها[5] در این قسمت قرار می گیرند. این نشانگرها می تواند شامل صفحه‌های مختلف نمایش کامپیوتری باشند که توسط نرم‌افزار، ارتباط لازم با سیستم را ایجاد می کند. در انتها باید خاطر نشان ساخت که بررسی سیستم‌ها در این چهارچوب منحصر به فرآیندهای مهندسی نبوده، و انواع سیستم‌های اجتماعی، رشد اقتصادی جامعه و غیره نیز می تواند به صورت اصولی و بدین ترتیب مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

۳.۱ عناصر مفهومی سیستم‌های کنترل

مهمترین شاخص نظریه کنترل، قابل استفاده بودن آن در زمینه های مختلف مهندسی و حتی غیر مهندسی می باشد. علت توفیق نظریه کنترل در زمینه های مختلف مهندسی برق، مکانیک، شیمی، تحقیق در عملیات و اقتصاد، توانائی توصیف مسائل مختلف در یک چهارچوب ریاضی و مهندسی یکسان است. شکل۱-۳ نمایش مفهومی سیستم‌های کنترل می باشد. در این نمایش P نمایش دهنده فرآیند است که توسط مدل ریاضی آن تعیین می شود. خروجی فرآیند y ورودی‌های آن u, w می باشند که کلیه این کمّیت ها به صورت برداری در نظر گرفته می شوند. u ورودی کنترل و w ورودی اغتشاشی فرآیند نامیده می شود. حسگرها نیز با نماد ریاضی S نشان داده شده است که در اثر اندازه گیری متغیرهای خروجی فرآیند y تحت نویز اندازه گیری n، مقدار اندازه-گیری شده y_m را تولید می کند. کنترل کننده را با C نمایش داده‌ایم که با استفاده از اطلاعات خروجی های اندازه گیری شده y_m و استراتژی کنترل از پیش تعیین شده، فرمان کنترل y را توسط عملگرها ایجاد می کند. در این نمایش عملگرها جزئی از فرآیند دیده شده اند.

[1] Inputs
[2] Actuators
[3] Analog to digital convertors
[4] Digital to analog convertors
[5] Gauges

www.ketab.ir



شکل۱-۳: عناصر مفهومی سیستم های کنترل

۴.۱ فرآیند طراحی کنترل کننده

هدف از طراحی کنترل کننده این است که:

علیرغم وجود اغتشاشات w، نویز اندازه گیری n، عدم دقت در مدلسازی فرآیند P و محدودیتهای عملگرها و حسگرها حتی المقدور خروجی سیستم $y(t)$ نزدیک به مقدار مطلوب $y_d(t)$ باقی بماند.

طراحی کنترل کننده به معنای ایجاد رابطه ریاضی مناسب یا استراتژی منطقی مناسب C برای رسیدن به هدف فوق است. عامل مهم فیدبک یعنی در دسترس داشتن اطلاعات خروجی y_m برای تولید فرآیند کنترلی u ضروری است. می توان نشان داد که با وجود فیدبک میتوان هدف کنترلی فوق را علیرغم محدودیت‌ها و خواست‌های چندگانه به دست آورد. به منظور طراحی کنترل کننده مناسب مراحل زیر بایستی محقق گردد.

- مدل‌سازی فرآیند
- مشخص نمودن مشخصات فیزیکی w, y_d در حوزه زمان یا فرکانس
- مشخص نمودن معیار یا معیارهای کارایی $(y(t) \cong y_d(t))$
- مدل‌سازی ریاضی عملگرها، سنسورها، مبدلها و مشخصات فیزیکی و اندازه گیری
- مشخص نمودن ساختار کنترل‌کننده به عنوان مثال *PID* یا فیدبک حالت و ...

در این حالت مرحله طراحی کنترل کننده بدین صورت دنبال می شود که با استفاده از نظریه کنترل کلاسیک یا کنترل مدرن ضرایب کنترل کننده (PID) یا بهره حلقه فیدبک حالت تعیین می گردد. پس از طراحی کنترل کننده نحوه پیاده‌سازی آن توسط کنترل‌کننده‌های آنالوگ یا دیجیتال می بایست بررسی شده و رابط کاربر HMI[1] لازم بایستی طراحی و اجرا گردند. همچنین انتخاب مناسب حسگرها و عملگرهای مناسب برای سیستم ضروری است. همانگونه که مشخص است طراحی موفق کنترل کننده و پیاده سازی آن نیاز به چند تخصص (مهندسی برق، مکانیک، شیمی، کامپیوتر و ...) داشته، لذا غالباً این عملیات به صورت گروهی صورت می پذیرد

[1] Human machine interface

www.ketab.ir

ولی در هرحال مهندس کنترل به عنوان مدیر پروژه یا یکی از افراد کلیدی آن، بایستی آشنائی با کلیه زیرمجموعه ها را داشته باشد.

همانگونه که از این مقدمه مشخص است، پل واسط بین نظریه کنترل و پیاده سازی آن در فرآیندهای مختلف مدل‌سازی دینامیکی آن فرآیند می باشد. نحوه مدلسازی و نگرش طراح در این زمینه، روشهای متنوع طراحی کنترل کننده را سبب شده است. در دیدگاه کلاسیک، مدل‌سازی در حوزه فرکانسی به صورت توابع تبدیل صورت پذیرفته و کلیه مشخصه های کارایی و پایداری سیستم را در این حوزه بررسی می کنیم. این نظریه که در دهه ۵۰ میلادی به اوج خود رسیده است با قضایای بودی[1] و نایکویست[2] و روشهای تحلیلی در طراحی کنترل کننده های PID، به صورت کامل در کلیه صنایع و سیستم‌های کنترل فرآیندهای صنعتی رسوخ کرده است.

در انتهای دهه ۵۰ و دهه ۶۰ نگرش مدرن به مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی به صورت فضای حالت و استفاده از روش‌های عددی و کامپیوتری به جای روش‌های تحلیلی جای خود را در میان نظریه کنترل باز نموده است. این نگرش به دیدگاه مدرن مشهور است که موضوع این کتاب می باشد. با این نگرش و با ترتیب فصول زیر مسئله طراحی کنترل کننده مدرن مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

در فصل دوم مروری بر جبر خطی صورت می گیرد. به منظور انجام عملیات ریاضی لازم در روشهای کنترل مدرن، دانش جبر خطی پیش زمینه بوده و معمولا مطالعه جبر خطی به عنوان پیش نیاز کنترل مدرن مطرح است. در این فصل با در نظر گرفتن این موضوع و به منظور یادآوری مطالب جبر خطی مطالب مورد نیاز آن در کنترل مدرن مرور خواهد شد. در فصل سوم با عنایت به اینکه اولین مرحله در طراحی کنترل کننده، شناخت سیستم یا فرآیند می باشد، با استفاده از قوانین حاکم بر فیزیکی حاکم بر سیستم‌های الکتریکی، الکترومکانیکی، مکانیکی و هیدرولیکی دسته قابل توجهی از سیستم های صنعتی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و مدل آنها به فرم فضای حالت به دست می آید. فرم فضای حالت با بهره‌گیری از متغیر حالت مبنای اصلی روش‌های مدرن تحلیل و طراحی در سیستم‌های کنترل می باشد. با توجه به ویژگی متغیر حالت در فشرده سازی اطلاعات، اهمیت استفاده از آن در مدل‌سازی سیستم‌های خطی بیان شده است. در تکمیل این بررسی مثال‌هایی از سیستم‌های مهم حرارتی، شیمیایی و الکترومغناطیسی در بخش مسائل این فصل معرفی می گردند و با ارائه اصول فیزیکی حاکم، به مدلسازی آنها خواهیم پرداخت. برای مدل‌سازی سیستم‌های مکانیکی روش لاگرانژ که مبتنی بر معادلات انرژی در این گونه سیستم‌ها می باشد به عنوان روشی مؤثر معرفی شده است. همچنین روش عمومی خطی سازی سیستم‌های غیر خطی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در پایان این فصل با اشاره به این موضوع که کلیه مدل‌های به دست آمده تنها تقریب غیر دقیق ریاضی از سیستم واقعی می باشند، که ارتباط بین ورودی و خروجی را به فرم معادلات دیفرانسیل مشخص می سازند، توجه خواننده را به نامعینی در مدل-سازی معطوف ساخته و انواع نامعینی های معرفی شده اند.

در فصل چهارم با هدف به دست آوردن پاسخ سیستم‌های خطی در اثر شرایط اولیه و ورودی معین، خصوصیات سیستم‌های خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین ترتیب پاسخ سیستم به دو بخش بدون ورودی و

[1] Bode theorem
[2] Nyquist criteria

www.ketab.ir

بدون شرایط اولیه تجزیه شده است و با توجه به اصل رویهم گذاری سیستم‌های خطی، پاسخ کامل سیستم با تعیین این دو جزء به صورت مستقل به دست آمده است. در این راستا ماتریس تبدیل حالت سیستم تعریف شده است. این نمایش نه تنها پاسخ کلیه سیستم‌های خطی را به صورت عمومی تعیین می کند، اهمیت بردار متغیر حالت را در فشرده سازی اطلاعات ورودی در خود جای داده است. در ادامه، ویژگی‌های اصلی ماتریس انتقال حالت و مشابهت آن با توابع نمائی نشان داده شده است و روش‌های مختلف تعیین تحلیلی و عددی آن بررسی شده اند. در پایان فصل سوّم نیز روش‌های نمایش سیستم به صورت غیر مزدوج یا قطری را که در تسریع عملیات عددی سیستم‌ها حائز اهمیت است، با معرفی تبدیل همانندی تشریح نموده و در حالت عمومی فرم بلوکی–جردن به دست آمده است.

در فصل پنجم مفاهیم کنترل پذیری، رویت‌پذیری، پایدار پذیری و آشکار پذیری تشریح شده اند. اپراتور کنترل-پذیری به عنوان نگاشتی بین توابع بی نهایت بعدی ورودی و متغیر حالت n بعدی، فشرده سازی اطلاعات ورودی به مقدار اولیه متغیر حالت را به عهده داشته و در صورتی که رتبه این نگاشت کامل باشد سیستم کنترل‌پذیر نامیده می شود. به همین صورت دوگان، اپراتور رویت‌پذیری به عنوان نگاشتی خطی بین متغیر حالت n بعدی و خروجی بی‌نهایت بعدی سیستم عمل کرده و خاصیت رویت‌پذیری تعداد و چیدمان سنسورهای لازم را به منظور تعیین وضعیت سیستم در آن مشخص می‌کند. این دو خصوصیت قبل از طراحی هر نوع کنترل کننده مدرن برای سیستم‌های خطی بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. با استفاده از تعاریف و قضایای مربوط به این خصوصیات، روشهای تحلیل کنترل پذیری و رویت‌پذیری سیستم‌های خطی ارائه شده و ارتباط آن با وجود مودهای پنهان یا حذف صفر و قطب در نمایش ماتریس تبدیل سیستم، بحث کشیده شده است. در انتها با ارائه روش-های تجزیه سیستم به مودهای کنترل‌پذیر، رویت‌پذیر، کنترل‌ناپذیر و رویت‌ناپذیر نحوه تفکیک اجزاء سیستم به فرم کالمن تشریح شده است.

در فصل ششم با روشهای تحقق سیستم‌های خطی و روشهای تحلیل پایداری آنها آشنا می شویم. تحقق سیستم به معنای نمایش یک سیستم به فرم فضای حالت در صورت معین بودن فرم ماتریس تبدیل آن می باشد. از آنجائی که بر خلاف نمایش ماتریس تبدیل، فرم فضای حالت سیستم یکتا نمی باشد، تحقق های بسیاری برای یک ماتریس تبدیل قابل بیان است. از آن جمله تحقق های کنترل‌پذیری، رویت‌پذیری، رویت‌گر، کنترل‌کننده و تحقق جردن می باشند که در این فصل تشریح شده اند، و به ویژگیهای اصلی آنها اشاره شده است. فرم جامع تحقق در حالت چند ورودی- چند خروجی نیز در نهایت تشریح شده است.

تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل شرط اولیه و مهم در طراحی هر نوع سیستم کنترلی می باشد. این مهم توسط قضایای مبسوط پایداری که در فصل پنجم ارائه شده است، بررسی شده است. در ابتدا تعاریف پایداری سیستم‌های غیر خطی و خطی را طرف توجه قرار داده ایم و پس از ارائه قضیه مهم لیاپانوف در تحلیل پایداری سیستم‌های غیر خطی قضایای منتج شده برای سیستم‌های خطی ارائه شده است. پایداری داخلی که مهمترین نوع پایداری سیستم‌های خطی می باشد، در انتها مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته است.

در فصل هفتم اصول طراحی فیدبک حالت با دو روش جایابی قطب و کنترل بهینه LQR ارائه شده است. در این فصل ابتدا اهداف عمومی طراحی کنترلر برای سیستم‌های صنعتی را بر شمرده، و حفظ پایداری سیستم به علاوه

www.ketab.ir

مساله تنظیم و یا تعقیب، به صورت دقیق تعریف شده است. همچنین نشان داده شده است که مسئله تعقیب با تعمیم روش تنظیم قابل دستیابی است. لذا در ادامه، حل مسئله تنظیم توسط دو روش جایابی قطب و کنترلر بهینه LQR ارائه شده است و آلگوریتمهای مختلف حل عددی این مسائل نیز تشریح شده اند. در پایان این فصل به منظور بررسی روشهای رفع اغتشاش ثابت و متغیر در سیستم‌های کنترل به تعمیم روش فوق و اضافه نمودن ترم پیش خور رفع اغتشاش و همچنین فیدبک انتگرال حالت پرداخته شده است.

روش مدرن کنترل سیستم‌های صنعتی مبتنی بر فیدبک حالت می باشد. این در حالی است که معمولاً در این سیستم‌ها کلیه حالت‌های سیستم در دسترس نبوده و تنها خروجی‌های خاصی از سیستم مورد اندازه گیری واقع می‌شوند. در فصل هفتم ایده تخمین متغیرهای حالت با استفاده از خروجی‌های سیستم بسط داده شده است. رویتگر حالت به عنوان سیستم دینامیکی که مبتنی بر مشخصات سیستم و اطلاعات خروجی تشکیل می شود، نیاز طراح را به اندازه‌گیری کلیه متغیرهای حالت مرتفع می سازد و متغیرهای تخمین زده شده را در حلقه فیدبک استفاده می نماید. علی رغم اینکه رویتگر حالت بدین منظور در ادبیات کنترل مدرن معرفی شده است، به خاطر ویژگی‌های منحصر بفرد خود، مورد استقبال و استفاده در بسیاری از کاربردهای دیگری که به نوعی پالایش یا پیش بینی در آنها مورد نیاز است قرار گرفته است. حل مسئله رویت‌گر حالت، خوشبختانه دوگان حل مسئله فیدبک حالت بوده، و کلیه روش‌های تشریح شده در تعیین بهره فیدبک حالت، به صورت متناظر در حل مسئله رویتگر حالت نیز مورد استفاده قرار می گیرد. بدین ترتیب روش‌های جایابی قطب و رویتگر بهینه فیدبک حالت که به فیلتر کالمن مشهور است تشریح شده اند. در ادامه این فصل رویت‌گرهای با کاهش مرتبه یا لوئنبرگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. و در پایان با ترکیب رویت‌گر حالت و فیدبک حالت ویژگی‌های استفاده از متغیر حالت تخمین زده شده در حلقه فیدبک بررسی شده است.

در کلیه بخشها با ارائه مثال‌های صنعتی نحوه عملی تنظیم کننده کنترل کننده فیدبک حالت و بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری محقق شده است. و با ارائه مثال‌های صنعتی همانند فصول قبل، نحوه تنظیم پارامترهای کنترل کننده و رویتگر و همچنین بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته صورت پذیرفته است.

۵.۱ جمع بندی

در این فصل ابتدا ضرورت و مشخصات سیستم‌های کنترل معرفی شده و با ارائه مثالهای مختلف صنعتی و اجتماعی علّت اصلی استفاده از سیستمهای کنترل تشریح گشته است. سپس عناصر اصلی سیستم‌های کنترل در قالب عناصر فیزیکی و مفهومی در این گونه سیستم‌ها معرفی شده و روش طراحی عمومی سیستم‌های کنترل بیان شده است. بدین ترتیب و با توجه به نحوه نگرش طراح به این مسائل، روشهای طراحی به دو دسته کلاسیک و مدرن تقسیم شده است. با توجه به محتوی این کتاب نحوه ارائه روش مدرن طراحی کنترلر که در سایر فصل‌های این کتاب به تشریح آنها خواهیم پرداخت، به صورت خلاصه معرفی شده است.

www.ketab.ir