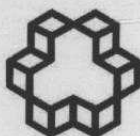


تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل خطی

www.ketab.ir

علی خاکی صدیق



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شماره ۳۵۳

سرشناسه: خاکی صدیق، علی، ۱۳۴۱ -

عنوان و نام پدیدآور: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل خطی / علی خاکی صدیق.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۳.

مشخصات ظاهری: ۳۶۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.

شابک: 978-600-6383-67-5

وضعیت فهرست نویسی: خپا.

موضوع: سیستم‌های کنترل خطی

رده بندی کنگره: ۱۳۹۳ ۳خ ۲/۲۰۰ T.J

رده بندی دیویی: ۶۲۹/۸۳۲

شماره کتابشناسی ملی: ۳۴۶۹۷۳۵

www.press.kntu.ac.ir



ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

عنوان: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل خطی

تألیف: دکتر علی خاکی صدیق

نوبت چاپ: سوم

تاریخ انتشار: تیر ۱۳۹۶، تهران

شمارگان: ۱۵۰۰ نسخه

چاپ: عرش دانش

صحافی: گرنامی

بها: ۳۰۰۰۰ تومان

(تمام حقوق برای ناشر محفوظ است)

خیابان میرداماد غربی - پلاک ۴۷۰ - انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲

میدان ونک - خیابان ولی عصر (عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - پلاک ۲۶۲۶ - مرکز پخش و فروش انتشارات

تلف: ۸۸۷۷۲۲۷۷ - ایمیل: press@kntu.ac.ir - تابلو: (فروش آنلاین) - www.press.kntu.ac.ir

پیش‌گفتار ----- ش

فصل اول: آشنایی با سیستم‌های کنترل

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	فیدبک و سیستم‌های کنترل	۲
۳-۱	نگاهی کوتاه به تاریخ مهندسی کنترل	۵
۴-۱	چند مثال عملی از سیستم‌های کنترل	۹
۵-۱	تعریف‌های پایه در سیستم‌های کنترل	۱۴
مسائل		۱۷
مراجع		۱۸
مطالعه‌ی بیشتر		۱۸

فصل دوم: نمایش سیستم‌های کنترل خطی

۱-۲	مقدمه	۲۲
۲-۲	نمایش تابع تبدیل سیستم‌های خطی	۲۲
۳-۲	دیاگرام‌های بلوکی	۲۵
۱-۳-۲	اجزای اصلی دیاگرام‌های بلوکی	۲۵
۲-۳-۲	عملیات جبری دیاگرام‌های بلوکی	۲۶
۳-۳-۲	رسم دیاگرام بلوکی سیستم‌های فیزیکی	۲۸
۴-۲	نمودارهای گذر سیگنال	۳۰
۱-۴-۲	جبر نمودار گذر سیگنال	۳۲
۲-۴-۲	نمایش نمودار گذر سیگنال سیستم‌های خطی	۳۴
۵-۲	توصیف فضای حالت سیستم‌های کنترل	۳۸
۱-۵-۲	به‌دست آوردن معادله‌های حالت از تابع تبدیل	۴۰
۲-۵-۲	رابطه بین تابع تبدیل و معادله‌های فضای حالت	۴۷
۶-۲	آشنایی با سیستم‌های غیرخطی	
۱-۶-۲	رفتارهای غیرخطی در سیستم‌ها	۴۸
۲-۶-۲	مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی	۵۰
۳-۶-۲	خطی‌سازی حول نقطه تعادل	۵۱
۷-۲	مثال‌های کاربردی	۸۳
۱-۷-۲	مدل‌سازی موتورهای DC	
۲-۷-۲	سیستم تعلیق خودرو	۵۶
۳-۷-۲	هواپیماهای کنترل شده با بردار رانش	۶۰
مسائل		۶۲
مراجع		۶۹
مطالعه‌ی بیشتر		۶۹

فصل سوم: تحلیل عملکرد گذرا و ماندگار سیستم‌های کنترل

۷۲	۱-۳ مقدمه
۷۳	۲-۳ ورودی‌های استاندارد برای تحلیل عملکرد سیستم‌های کنترل
۷۵	۳-۳ پاسخ حالت ماندگار
۷۵	۱-۳-۳ پاسخ حالت ماندگار به ورودی‌های پله، شیب و سهموی
۷۷	۲-۳-۳ ورودی‌های سینوسی و چندجمله‌ای
۷۸	۴-۳ پاسخ حالت گذرا
۷۹	۱-۴-۳ پاسخ میرای شدید
۸۰	۲-۴-۳ پاسخ میرای بحرانی
۸۱	۳-۴-۳ پاسخ میرای ضعیف
۹۳	۵-۳ اثرات اضافه کردن صفر و قطب به توابع تبدیل
۹۳	۱-۵-۳ قطب‌های الب توابع تبدیل
۹۴	۲-۵-۳ اثر قطب‌های غالب اضافی
۹۵	۳-۵-۳ اثر صفرهای اضافی
۹۶	۶-۳ تحلیل خطای حالت ماندگار سیستم‌های کنترل
۹۷	۱-۶-۳ نوع سیستم
۹۹	۲-۶-۳ خطای حالت ماندگار
۱۰۳	۳-۶-۳ اثرات حالت ماندگار اغتشاش خط اندازه‌گیری
۱۰۵	مسائل
۱۰۹	مراجع
۱۰۹	مطالعه‌ی بیش‌تر

فصل چهارم: اثرات فیدبک و تحلیل پایداری در سیستم‌های کنترل

۱۱۲	۱-۴ مقدمه
۱۱۲	۲-۴ تحلیل پایداری
۱۱۴	۱-۲-۴ روش روث
۱۱۹	۲-۲-۴ روش هرویتز
۱۲۰	۳-۲-۴ تحلیل پایداری در فضای حالت
۱۲۱	۳-۴ اثرات فیدبک بر عملکرد سیستم‌های کنترل
۱۲۲	۱-۳-۴ اثرات فیدبک بر بهره و ثابت زمانی سیستم مرتبه اول
۱۲۳	۲-۳-۴ اثر فیدبک بر اغتشاشات خارجی
۱۲۵	۳-۳-۴ اثر فیدبک بر حساسیت سیستم
۱۲۹	۴-۳-۴ اثر فیدبک بر پایداری سیستم
۱۲۹	مسائل
۱۳۴	مراجع
۱۳۴	مطالعه‌ی بیش‌تر

فصل پنجم: مکان ریشه

۱۳۶	۵-۱ مقدمه
-----	-----------

۱۳۶	۲-۵ رسم ریشه‌های معادله مشخصه
۱۳۹	۳-۵ خواص اساسی مکان ریشه
۱۴۲	۴-۵ قواعد ترسیم مکان ریشه
۱۶۲	۵-۵ نمودارهای مسیرهای ریشه
۱۶۵	مسائل
۱۶۹	مراجع
۱۶۹	مطالعه‌ی بیش‌تر

فصل ششم: تحلیل پاسخ فرکانسی

۱۷۲	۱-۶ مقدمه
۱۷۵	۲-۶ نمودارهای بودی
۱۷۷	۱-۲-۶ ترسیم نمودارهای بودی
۱۹۰	۲-۲-۶ مراحل ترسیم نمودارهای بودی
۱۹۳	۳-۲-۶ سیستم‌های غمی نیمم فاز
۱۹۵	۴-۲-۶ سیستم‌های ناخبردار
۱۹۶	۵-۲-۶ شناسایی تابع تبدیل سیستم توسط نمودار بودی
۱۹۹	۳-۶ نمودارهای نایکوئیست
۲۰۱	۱-۳-۶ نمودارهای نایکوئیست سیستم‌های نوع صفر، یک و دو
۲۰۵	۲-۳-۶ نمودار نایکوئیست سیستم‌های ناخبردار
۲۰۶	۳-۳-۶ خلاصه‌ای از قواعد کلی رسم نمودارهای نایکوئیست
۲۰۹	۴-۶ معیار پایداری نایکوئیست
۲۱۸	۵-۶ نمودارهای نایکوئیست معکوس
۲۲۰	۶-۶ اعمال معیار پایداری نایکوئیست به نمودارهای نایکوئیست معکوس
۲۲۳	۷-۶ مفاهیم حاشیه‌های بهره و فاز
۲۲۷	۸-۶ چارت نیکولز
۲۲۹	۱-۸-۶ پاسخ فرکانسی حلقه بسته
۲۳۳	۹-۶ مشخصه‌های عملکرد سیستم بر اساس پاسخ فرکانسی
۲۴۰	مسائل
۲۴۵	مراجع
۲۴۵	مطالعه‌ی بیش‌تر

فصل هفتم: روش‌های جبران‌سازی سیستم‌های کنترل

۲۴۸	۱-۷ مقدمه
۲۵۱	۲-۷ انواع جبران‌سازها
۲۵۱	۱-۲-۷ جبران‌ساز پیش فاز
۲۵۲	۱-۱-۲-۷ مشخصه‌های جبران‌سازهای پیش فاز
۲۵۴	۲-۲-۷ جبران‌ساز پس فاز
۲۵۴	۱-۲-۲-۷ مشخصه‌های جبران‌سازهای پس فاز
۲۵۴	۳-۲-۷ جبران‌ساز پس-پیش فاز

۲۵۶	۷-۲-۳-۱ مشخصه‌های جبران‌سازهای پس-پیش فاز
۲۵۸	۷-۲-۴ کنترل‌کننده‌های PI, PD و PID
۲۶۰	۷-۳ طراحی جبران‌سازها با استفاده از مکان ریشه
۲۶۲	۷-۳-۱ طراحی جبران‌سازهای پیش فاز با استفاده از مکان ریشه
۲۶۵	۷-۳-۲ طراحی جبران‌سازهای پس فاز با استفاده از مکان ریشه
۲۶۸	۷-۳-۳ طراحی جبران‌سازهای پس-پیش فاز با استفاده از مکان ریشه
۲۷۳	۷-۴ طراحی جبران‌سازها با استفاده از روش پاسخ فرکانسی
۲۷۵	۷-۴-۱ طراحی جبران‌سازهای پیش فاز با استفاده از روش پاسخ فرکانسی
۲۷۹	۷-۴-۲ طراحی جبران‌سازهای پس فاز با استفاده از روش پاسخ فرکانسی
۲۸۳	۷-۴-۳ طراحی جبران‌سازهای پس-پیش فاز با استفاده از روش پاسخ فرکانسی
۲۸۵	۷-۴-۴ جبران‌سازی با استفاده از چارت نیکولز
۲۸۹	مسائل
۲۹۳	مراجع
۲۹۳	مطالعه‌ی بیش‌تر

فصل هشتم: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل در فضای حالت

۲۹۶	۸-۱ مقدمه
۲۹۷	۸-۲ حل معادلات حالت و خروجی
۲۹۹	۸-۲-۱ حل کامل معادلات حالت و خروجی
۲۹۹	۸-۲-۲ روش تبدیل لاپلاس در حل کامل معادلات حالت و خروجی
۳۰۱	۸-۳ معادله مشخصه
۳۰۴	۸-۴ کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری
۳۰۴	۸-۴-۱ مفاهیم کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری
۳۰۵	۸-۴-۱-۱ رویت‌پذیری
۳۰۶	۸-۴-۲ آزمون‌های کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری
۳۰۸	۸-۴-۳ کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری در توابع تبدیل
۳۱۰	۸-۵ طراحی سیستم‌های کنترل در فضای حالت
۳۱۰	۸-۵-۱ جایابی قطب با فیدبک حالت
۳۱۳	۸-۵-۲ طراحی رویتگر
۳۱۴	۸-۵-۲-۱ رویتگر حالت
۳۱۵	۸-۵-۳ سیستم حلقه بسته فیدبک حالت با رویتگر
۳۲۰	مسائل
۳۲۳	مراجع
۳۲۳	مطالعه‌ی بیش‌تر
۳۲۵	پیوست
۳۴۳	مراجع
۳۴۵	واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
۳۴۹	نمایه

این کتاب به اصول تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل می‌پردازد. مخاطبان اصلی کتاب، دانشجویان تمامی رشته‌های مهندسی هستند که برای اولین بار با مفاهیم سیستم‌های کنترل آشنا خواهند شد. چاپ اول این کتاب به درخواست گروه برق دانشگاه پیام نور در سال ۱۳۷۴ تألیف و به صورت طرح درس‌نامه‌ای چاپ گردید. ویرایش کنونی کتاب که پس از گذشت سال‌ها از چاپ اولیه آن منتشر می‌شود، تفاوت‌های بسیاری با آن دارد. مطالب کتاب به روز شده‌اند و با توجه به سال‌ها تدریس و پژوهش در زمینه تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل، ایده‌های جدیدی در تألیف کتاب آورده شده‌اند. هم‌چنین، بخش‌هایی به کتاب اضافه شده است و بخش‌هایی نیز حذف شده‌اند. اما در تألیف کتاب به این نکته اصلی توجه شده است که کتاب از حالت روان و خودآموز بودن پیشین آن خارج نشود و تمام مطالب مورد نیاز در درس سه واحدی سیستم‌های کنترل خطی آورده شوند. هم‌چنین، از آوردن موضوعاتی خارج از محدوده درس پرهیز شده تا حجم کتاب چندان افزون نگردد. مسائل متنوع و بسیاری در پایان هر فصل گنجانده شده است که خواننده می‌تواند با حل آن‌ها، مفاهیم طرح شده در فصل را عمیق‌تر درک نماید. مراجع کتاب در دو بخش دسته‌بندی شده‌اند. دسته اول مراجعی هستند که در پایان هر فصل آورده شده است و می‌توان جهت بررسی دقیق‌تر مطالب و هم‌چنین مطالب حاشیه‌ای در ارتباط با مطالب ارائه شده در همان فصل، به آن‌ها مراجعه کرد. دسته دوم، مراجع عمومی هستند که کتاب‌های درسی مهندسی کنترل را شامل می‌گردد و در ارائه مطالب کتاب از بسیاری از آن‌ها استفاده شده است. هم‌چنین، به منظور وسیع‌تر کردن دیدگاه‌های خواننده در رابطه با مطالب ارائه شده و مطالب مهمی که در حاشیه آن‌ها وجود دارد، در پایان فصل، بخشی با عنوان مطالعه‌ی بیش‌تر آورده شده، که مفاهیم عمیق‌تری در زمینه‌های مطرح شده در فصل در آن آورده شده است. در تألیف کتاب از ارائه اثبات ریاضی قضیه‌های مطرح شده خودداری شده است و خواننده علاقه‌مند به پیشینه ریاضی برخی مطالب ارائه شده می‌تواند به بخش مطالعه‌ی بیش‌تر فصل مراجعه نماید.

پیش‌نیاز ریاضی مطالعه کتاب، آشنایی با معادلات دیفرانسیل معمولی، تبدیل لاپلاس، نظریه بردارها و ماتریس‌ها است. اما، به منظور کم کردن حجم کتاب، از ارائه آن‌ها در سمیم‌های مستقل خودداری شده است و خواننده بایستی با این مفاهیم آشنایی داشته باشد. هم‌چنین، آشنایی با نرم‌افزارهای در دسترس تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل به ویژه MATLAB، برای استفاده بهینه از مطالب کتاب الزامی است. به کارگیری MATLAB برای رسم نمودارهای مختلف، انجام طراحی‌ها و بررسی رفتار سیستم‌های حلقه باز و حلقه بسته اکیداً توصیه می‌گردد. مثال‌های این کتاب با MATLAB حل شده‌اند و برای آشنایی خواننده ضمن مطالعه شامل تمام برنامه‌های نوشته شده با MATLAB در آخر کتاب آورده شده است.

در ترجمه لغات سعی شده است که از معادل‌های متداول فارسی استفاده گردد و جهت مراجعه سریع در واژه‌نامه پایان کتاب این معادل‌ها آورده شده‌اند.

مطالب کتاب در هشت فصل مستقل ارائه شده است. فصل اول به تعاریف اولیه سیستم‌های کنترل می‌پردازد. فصل دوم مدل‌سازی و نمایش سیستم‌های کنترل خطی را ارائه می‌کند. در فصل سوم، تحلیل عملکرد گذرا و ماندگار سیستم‌های کنترل بررسی شده است. فصل چهارم اثرات فیدبک را به همراه دو مفهوم پایداری و حساسیت بررسی می‌کند. مکان ریشه به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل، در فصل پنجم مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل پاسخ فرکانسی، روشی دیگر جهت تحلیل سیستم‌های کنترل است، که با توجه به کاربردهای وسیع آن در تحلیل و طراحی سیستم‌های عملی، مورد توجه مهندسان کنترل است. در فصل ششم سه ابزار مهم تحلیل پاسخ فرکانسی، نمودارهای بودی و نایکوئیست و چارت نیکولز به همراه کاربردهای آن‌ها آورده شده است. فصل‌های هفتم و هشتم به طراحی سیستم‌های کنترل می‌پردازند. فصل هفتم، پس از معرفی جبران‌سازهای پس فاز، پیش فاز و پس-پیش فاز به ارائه روش‌های طراحی این جبران‌سازها پرداخته است. در

روش‌های ارائه شده، از مکان ریشه، نمودارهای بودی و چارت نیکولز استفاده خواهد شد. در هر بخش، مثال‌هایی جهت روشن‌تر نمودن مراحل طراحی گنجانده شده است که به همراه نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های حلقه باز و حلقه بسته، دست‌آوردهای طراحی سیستم‌های کنترل را نمایان‌تر می‌کند. فصل هشتم تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل در فضای حالت را بررسی می‌کند. در این فصل مفاهیم اولیه و در حد نیاز فضای حالت برای درس کنترل خطی ارائه می‌شوند و از ورود به پایه‌های ریاضی بحث اجتناب شده است. خواننده می‌تواند بدون از دست دادن مفاهیم اصلی، مطالب مربوط به رویت‌پذیری و طراحی رویتگر در فصل هشتم را حذف نماید.

در آماده‌سازی این کتاب همکاران بسیاری اینجانب را یاری نموده‌اند که از تمامی آن‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایم. مرحوم جناب آقای دکتر محمدحسن شناسا ویراستاری چاپ اول این کتاب را برعهده داشت که از خداوند متعال برای ایشان علو درجات و مغفرت واسعه الهی را خواستارم. آقای دکتر علی مرادی امانی در آماده‌سازی اولیه ویرایش کنونی کتاب زحمات و هم‌فکری فراوانی داشتند و توجه ایشان در پیش‌برد تألیف کتاب بسیار سازنده بود. از تمام دانشجویانی که در طی سال‌های پیشین، پیشنهادهای و اصلاحاتی برای بهبود کتاب داشتند تشکر می‌کنم. به ویژه آقای محمد، غمانی به همراه آقایان امیر سامان اشتری و یاسر شیرمحمدی از دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی کنترل که با دقت تمام در بازخوانی متون، اجرای شبیه‌سازی‌ها و رسم شکل‌ها کمک شایانی نمودند، قدردانی می‌نمایم. در پایان از خانواده‌ام که همواره با صبر و حوصله فراوان، همراهانی هم‌فکر و مشفق بودند کمال تشکر را دارم و این کتاب را با روح پدر بزرگوارم که اولین معلم اخلاق اینجانب بود، تقدیم می‌نمایم.

فروردین ماه ۱۳۹۳

علی خاکی صدیق

استاد دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی