

کنترل و سیستم‌های دینامیک

تألیف: دکتر علی غفاری

عادل مقصود پور

علیرضا پور ممتاز

www.ketab.ir

سرشناسه	: غفاری، علی، ۱۳۳۳ -
عنوان و نام پدیدآور	: کنترل و سیستم‌های دینامیک/ تألیف علی غفاری، عادل مقصودپور، علیرضا پورممتاز.
وضعیت ویراست	: ویراست ۲.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۲.
مشخصات ظاهری	: ۴۶۰ ص.: جدول، مصور، نمودار.
فروست	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: ۱۸۸.
شابک	: ۲۵۰۰۰ ریال: 1-3-94808-964-978
فروست	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: ۲۴۵.
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا (چاپ دوم)
یادداشت	: پشت جلد به انگلیسی: Ali Gaffari, Adel Maghsoudpour, Alireza Pourmمتاز. Control and dynamic systems.
یادداشت	: چاپ دوم.
یادداشت	: چاپ سوم: ۱۳۸۷ (فیبا).
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۴۵۹-۴۶۰.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: نظریه کنترل
موضوع	: تجزیه و تحلیل سیستم‌ها
شناسه افزوده	: مقصودپور، عادل
شناسه افزوده	: پورممتاز، علیرضا، ۱۳۴۳ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. انتشارات.
رده بندی کنگره	: ۱۳۸۲ ۷۷۷/۳/۴۲۰۲ QA۴۰۲/۳
رده بندی دیویی	: ۶۲۹/۸۳۱۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۱۵۳۸۲۹۵

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  <http://publication.kntu.ac.ir>

نام کتاب: کنترل و سیستم‌های دینامیک

تألیف: دکتر علی غفاری عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی، عادل مقصودپور، علیرضا پورممتاز

آماده سازی: فرافرنگ (حمیرا قدیانی، علی اسدی)

چاپ اول: ۱۳۹۳

تاریخ چاپ: آذر ۱۳۹۳

تیراژ: ۱۰۰۰ جلد

قیمت: ۲۴۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۱۸۸

ISBN: 978- 964- 94808-3-8

شابک: ۹۷۸-۹۶۴- ۹۴۸۰۸-۳-۱

چاپ: پدیدرنگ

صحافی: گرنامی

آدرس و تلفن مرکز بخش و فروش: خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی

ساختمان اسکان (۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

پیش‌گفتار

هدف علم کنترل تدوین تئوری‌ها و اصول و قواعد لازم برای تنظیم رفتار سیستم‌های دینامیکی است. شاخه مهندسی کنترل از زمان پیدایش و در طی نیم قرن گذشته نقش بسیار بارزی در پیشرفت‌های تکنولوژیک معاصر داشته است. دستاوردهای عظیم فضایی و هوایی، کیفیت مطلوب عملکرد فرایندهای صنعتی، دقت بالای ماشین‌ها ابزار اتوماتیک و CNCها و هر سیستمی که به نحوی رفتارش به‌نظم درمی‌آید همه مرهون پیشرفت‌های حاصله در عرصه علم کنترل است.

امروزه کنترل تنها به مباحث مهندسی محدود نمی‌شود. کاربرد تئوری‌های کنترل در سیستم‌های اقتصادی، سیاسی، مدیریتی و امثالهم نتایج بسیار ارزشمندی را از نظر تجزیه و تحلیل و تنظیم رفتار این گونه سیستم‌ها به همراه داشته است. در سال‌های اخیر سیستم‌های بیولوژیکی نظیر سیستم بدن انسان به‌عنوان مجموعه‌های بسیار ظریف و زیبا و اعجاب‌انگیز و در عین حال پیچیده کنترلی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هرچقدر مطالعه و بررسی در مورد سیستم‌هایی نظیر بدن انسان بیشتر می‌شود زیبایی مکانیزم‌های مختلف موجود در بدن بیشتر آشکار می‌گردد و تدبیر و تحسین نسبت به خالق متعال فزونی می‌یابد (تبارک‌الله احسن الخالقین).

اهمیت و کاربرد علم کنترل در شاخه‌های مختلف مهندسی و علوم باعث شده است که جهان علم توجه خاصی به این رشته مبذول دارد. امروزه نه تنها در دیپارتمان‌های برق و مکانیک و شیمی دانشکده‌های مهندسی بلکه در برخی از دانشکده‌های اقتصاد و علوم سیاسی نیز تئوری‌های کنترلی تدریس می‌شوند و پژوهش‌های مربوط به سیستم‌های کنترلی به اجراء درمی‌آیند.

کتاب حاضر در سطح دوره‌های کارشناسی رشته‌های مهندسی تألیف شده است و می‌تواند مورد استفاده مهندسين کنترل که مایلند با مبانی کنترل مدرن آشنا شوند نیز قرار گیرد علی‌رغم آنکه موضوعات این کتاب از حجم هر یک از دروس معمول کنترل دوره‌های کارشناسی رشته‌های مختلف مهندسی بیشتر است ولی تجربه مؤلف در طی ده سال گذشته نشان داده است که دانشجویان با علاقه بسیار و در طی یک درس ۲ واحدی همه مطالب این کتاب را می‌آموزند. با نظر مؤلف دانشجویان رشته‌های مهندسی و علوم، برای درک عمیق مفاهیم کنترلی باید ابتدا مفاهیم اساسی سیستم‌های دینامیکی را آموخته باشند. در این کتاب توجه خاصی به این امر شده است. در فصل اول کتاب، مفاهیم اولیه و تعاریف مربوط به سیستم‌های دینامیکی و کنترل ارائه می‌شود. فصول دوم و سوم کتاب به نمایش ریاضی و ترسیمی سیستم‌های دینامیکی اختصاص دارد. گرچه در این دو فصل تنها «سیستم‌های پیوسته خطی با پارامترهای مجزا» مورد بررسی قرار گرفته‌اند ولی هدف اصلی مؤلف آن است که خواننده اصول مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی را بیاموزد. در فصل دوم کتاب مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی از طریق مدل‌سازی اجزاء تشکیل‌دهنده آنها و سپس تلفیق این اجزاء و تعیین مدل کل سیستم انجام شده است. انواع سیستم‌های انرژی‌دار الکتریکی، مکانیکی، سیالاتی و حرارتی در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند و نحوه مدل‌سازی و تبدیل سیستم‌های معادل آنها ارائه می‌شوند. همچنین سیستم‌هایی که یک نوع انرژی را به نوع دیگری تبدیل می‌کنند (ترانس دیوسرها) و سیستم‌هایی که سطح سیگنال‌های ورودی و خروجی را تغییر می‌دهند (ترانسفورمرها) در انواع ایده‌آل و واقعی معرفی و مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

¹ Linear Continuous Systems With Lumped Parameters

در فصل سوم انواع نمایش‌های ریاضی و ترسیمی سیستم‌های دینامیکی ارائه شده است. در این فصل نمایش ریاضی در فضای حالت^۱ و معادلات برداری حالت^۲ ارائه شده و نحوه تعیین انواع نمایش‌های ریاضی (معادلات دیفرانسیل، معادلات برداری حالت و توابع تبدیل) از یکدیگر بیان شده است. نمایش ترسیمی سیستم‌های دینامیکی نیز به دو صورت دیاگرام جعبه‌ای^۳ و دیاگرام جریانی^۴ ارائه شده است.

فصل چهارم به تحلیل رفتار سیستم‌های دینامیکی می‌پردازد و با حل معادلات دیفرانسیل برداری حالت، اهمیت نقش مقادیر ویژه و بردارهای ویژه را در رفتار سیستم‌های دینامیکی مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین حل معادلات دینامیکی سیستم در فضای لاپلاس و ارتباط آن با حل در فضای متغیرهای حالت بررسی می‌شود. فصل پنجم به پایداری سیستم‌های دینامیکی اختصاص دارد. به منظور ایجاد شالوده محکمی در تفهیم پایداری، ابتدا مسیر حرکت^۵ سیستم‌های دینامیکی تشریح می‌شود و سپس تعاریف مربوط به پایداری لیپانوف و پایداری از دیدگاه ورودی و خروجی^۶ ارائه می‌شود. گرچه قضایای پایداری لیپانوف در این کتاب ذکر نمی‌شوند ولی نتایج مربوط به پایداری سیستم‌های خطی و روش‌های تعیین پایداری این سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

عنوان فصل ششم کتاب، کنترل فیدبک است. به نظر مؤلف قبل از آنکه خواننده با مفاهیم سیستم‌های دینامیکی آشنایی کامل پیدا کند و رفتار سیستم‌های دینامیکی را بشناسد و پیش از آنکه مفهوم پایداری را درک کرده باشد، مفاهیم و خواص سیستم‌های کنترل فیدبک را نمی‌تواند به‌خوبی درک نماید. به این خاطر است که پنج فصل اول این کتاب به سیستم‌های دینامیکی اختصاص یافته است و در فصول ششم و هفتم به مباحث مربوط به کنترل فیدبک پرداخته می‌شود.

^۱ State Space

^۲ State Vector Equations

^۳ Block Diagram

^۴ Signal Flow Diagram

^۵ Trajectory

^۶ Input Output Stability

در فصل ششم ابتدا خواص مربوط به سیستم‌های کنترل مدار بسته و مزایای آنها نسبت به سیستم‌های کنترل مدار باز ارائه می‌شوند. سپس معادلات دینامیکی سیستم‌های کنترلی مدار بسته و مشخصات رفتاری این سیستم‌ها با توجه به اعمال کنترل کلاسیک بررسی می‌شوند. سپس روش مکان هندسی ریشه‌ها به عنوان ابزار مناسبی جهت تحلیل مشخصات دینامیکی سیستم‌های مدار بسته بیان می‌گردد. در این فصل انواع کنترلرهای خطی و خواص آنها مورد مطالعه قرار می‌گیرند. همچنین تنظیم پارامتر کنترلرهای خطی در فرایندهای صنعتی ارائه می‌شود.

عکس‌العمل فرکانسی حالت ماندگار آنها و به کمک دیاگرام‌های نایکویست و بود مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرند. روش عکس‌العملی فرکانسی از یکسو با هدف شناسایی سیستم‌ها و از سوی دیگر به منظور طراحی سیستم‌های کنترلی مدار بسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فصل همچنین روش پایداری نایکویست و معیار طراحی کنترلرهای در سیستم‌های مختلف صنعتی ارائه می‌شوند. فصل هفتم با معرفی اصلاح‌کننده‌های مختلف و بررسی تأثیر آنها در رفتار سیستم‌های کنترلی مدار بسته خاتمه می‌یابد.

این کتاب با تشریح و توضیح کافی در موضوعات مختلف و با مثال‌ها و مسائل متنوع سعی کرده است نیاز دانشجویان دوره‌های کارشناسی و علاقمندان مباحث مهندسی کنترل کلاسیک را مرتفع نماید و امید است مورد استفاده دانشجویان و اصلاح و انتقاد استادان ارجمند و مدرسین گرامی دروس کنترل قرار گیرد. دو کتاب دیگر مؤلف تحت عناوین کنترل مدرن و تفکر فازی که جهت استفاده دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی تدوین گردیده و با دیدگاه کاربردی می‌توانند مورد استفاده مهندسین شاغل در مراکز کنترل صنعتی پیشرفته واقع شود به زودی آماده خواهد شد. امید است خوانندگان محترم مؤلف را با راهنمایی‌ها و انتقادات ارزنده خود در رفع نواقص کتاب یاری فرمایند تا در چاپ‌های بعدی ملحوظ گردد.

و من...التوفیق

علی غفاری

بهار ۱۳۷۴

پیش‌گفتار چاپ دوم

چاپ دوم کتاب کنترل و سیستم‌های دینامیکی با انجام اصلاحات متعدد و افزودن مطالب و موضوعات تازه به دانشجویان رشته‌های مهندسی، مهندسیین کنترل و جامعه دانشگاهی تقدیم می‌شود. در این چاپ تلاش شده است اشتباهات املایی و انشائی چاپ اول برطرف شود و کتاب با کیفیتی شایسته‌تر ارائه گردد. نمادهای مورد استفاده در این چاپ برحسب مورد، بر مبنای آخرین تغییرات موجود در منابع و مآخذ مهم کنترلی اصلاح شده است. همچنین با افزودن چندین پیوست سعی شده است مطالبی که مورد نیاز علاقمندان است به آن اضافه شود.

به منظور تحلیل و درک نحوه عملکرد سیستم‌های دینامیکی به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری، در پیوست ۱، با ذکر چند مثال مقدمات استفاده از نرم‌افزار MATLAB ارائه شده است.

در پیوست ۳ دیاگرام‌های بود، نایکویست، نیکولز و مکان هندسی ریشه‌های سیستم مدار بسته، برای انواع مختلفی از سیستم‌های دینامیکی مدار باز که توابع تبدیل آنها داده شده است رسم شده‌اند. مطالعه این قسمت علاقه‌مندان را با مشخصات و خواص مهم سیستم‌های دینامیکی معمول در مهندسی آشنا می‌سازد. در بخش دیگری از این پیوست نمایش فیزیکی انواع مختلفی از

سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی، هیدرولیکی همراه با توابع تبدیل هر یک از آنها ارائه شده است.

در پیوست ۶ جدول تبدیلات لاپلاس برای توابع مختلف ارائه شده است. از خوانندگان ارجمند کتاب تقاضا داریم نظرات، انتقادات و پیشنهادات اصلاحی خود را به مؤلفین ارائه نمایند تا در چاپ‌های بعدی ملحوظ گردد.

علی غفاری
عادل مقصودپور
علیرضا پورممتاز
بهار ۱۳۸۲

فهرست مطالب

• فصل اول

مفاهیم اولیه سیستم‌های دینامیکی و کنترل

۳	مقدمه:
۳	(۱-۱) تعریف سیستم:
۶	(۲-۱) متغیرهای حالت:
۸	(۳-۱) ورودی سیستم و خروجی سیستم:
۹	(۴-۱) سیستم دینامیکی:
۱۰	(۵-۱) سیستم‌های خطی و غیرخطی:
۱۰	(۶-۱) سیستم با پارامترهای مجزا و گسترده:
۱۲	(۷-۱) سیستم با پارامترهای ثابت و پارامترهای متغیر نسبت به زمان:
۱۲	(۸-۱) مفهوم کنترل، انواع سیستم‌های کنترل کلاسیک و نحوه تشخیص اجزای یک سیستم کنترلی:
۱۵	مسائل

• فصل دوم

نمایش اجزاء سیستم

۱۹	مقدمه:
----	--------

۲۰.....	سیستم‌های انرژی‌دار و اجزاء آنها:
۲۱.....	۱-۱-۲ اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار الکتریکی:
۲۸.....	۲-۱-۲ ترکیب اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار الکتریکی:
۲۸.....	الف) مدار سری:
۳۲.....	ب) مدار موازی:
۳۷.....	۳-۱-۲ اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار مکانیکی:
	الف) انتخاب اول برای معادل‌سازی سیستم‌ها (نیرو
۳۷.....	معادل پتانسیل و سرعت معادل جریان):
۳۷.....	الف-۱) مستهلک‌کننده b :
۳۸.....	الف-۲) جرم m :
۳۹.....	الف-۳) فنر k :
	ب) انتخاب دوم برای معادل‌سازی سیستم‌ها (نیرو
۴۲.....	معادل جریان - سرعت معادل پتانسیل):
۴۴.....	۴-۱-۲ ترکیب اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار مکانیکی:
۴۸.....	۵-۱-۲ اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار در سیالات:
۵۳.....	۶-۱-۲ ترکیب اجزاء انرژی‌دار در سیالات:
۵۶.....	۷-۱-۲ اجزاء سیستم‌های انرژی‌دار حرارتی:
۵۹.....	۳-۲ سایر سیستم‌های انرژی‌دار:
۶۲.....	۱-۲-۲ ترانس دیوسرها و ترانسفورمرها:
۶۳.....	۲-۲-۲ ترانس دیوسرها:
۶۵.....	۳-۲-۲ ترانسفورمرها:
۶۷.....	مسائل

• فصل سوم

نمایش سیستم‌های دینامیکی

۷۵.....	مقدمه:
۷۶.....	۱-۳ نمایش ریاضی سیستم‌های خطی پیوسته:
۷۷.....	۱-۱-۳ معادله برداری حالت:
	الف) معادله برداری حالت برای سیستم «یا یک ورودی و
۷۷.....	یک خروجی»:
	ب) معادله برداری حالت برای سیستم «با چند ورودی
۸۲.....	و چند خروجی»:
۸۵.....	۲-۱-۳ تبدیل لاپلاس:
۸۶.....	الف) تبدیل لاپلاس تابع $f(t) = e^{-\lambda t}$:

ب)	تبدیل لاپلاس تابع پله‌ای واحد:	۸۶
ج)	تبدیل لاپلاس تابع ضربه‌ای واحد:	۸۷
د)	تبدیل لاپلاس تابع پله‌ای واحد با تأخیر زمانی:	۸۸
ه)	تبدیل لاپلاس مشتق یک تابع:	۸۸
و)	تبدیل لاپلاس انتگرال یک تابع:	۸۹
۳-۱-۳)	تابع تبدیل:	۹۰
الف)	تابع تبدیل از معادله حالت (سیستم با یک ورودی و یک خروجی):	۹۲
ب)	قطب‌ها و صفرهای سیستم:	۹۵
ج)	تابع تبدیل از معادله حالت برای سیستم با چند ورودی و چند خروجی:	۹۶
۲-۳)	نمایش ترسیمی سیستم‌های خطی پیوسته:	۹۷
۱-۲-۳)	نمایش ترسیمی یک سیستم خطی رسته یک:	۹۸
۲-۲-۳)	نمایش ترسیمی سیستم رسته n با یک ورودی و یک خروجی:	۱۰۱
۳-۲-۳)	ساده کردن نمایش ترسیمی:	۱۰۵
۴-۲-۳)	معادلات برداری حالت از تابع تبدیل:	۱۰۸
	انتخاب نوع اول:	۱۱۲
	انتخاب نوع دوم:	۱۱۲
۳-۳)	سیستم‌های دینامیکی غیرخطی:	۱۱۳
	مسائل:	۱۱۶

• فصل چهارم

رفتار سیستم‌های خطی

	مقدمه:	۱۲۳
۱-۴)	رفتار سیستم آزاد:	۱۲۵
۱-۱-۴)	رفتار آزاد سیستم رسته یک:	۱۲۵
۲-۱-۴)	رفتار آزاد سیستم رسته n :	۱۲۷
۳-۱-۴)	حل سیستم آزاد با استفاده از تبدیل معکوس لاپلاس:	۱۳۳
۴-۱-۴)	حل سیستم آزاد به روش قطری کردن:	۱۳۷
۵-۱-۴)	مقادیر ویژه در صفحه مختلط و رفتار مربوط به هر مقدار ویژه:	۱۴۴
۲-۴)	رفتار سیستم با اعمال ورودی:	۱۴۵
۱-۲-۴)	رفتار سیستم رسته یک با ورودی:	۱۴۵
۲-۲-۴)	تفسیر انتگرال کانولوشن:	۱۵۰

۱۵۳	رفتار سیستم رسته n با ورودی $u(t)$: (۳-۲-۴)
۱۵۴	حل معادلات سیستم از طریق تبدیل معکوس لاپلاس: (۴-۲-۴)
۱۵۵	قضایای «مقدار اولیه» و «مقدار نهایی» : (۵-۲-۴)
۱۵۵	الف) قضیه مقدار نهایی: (الف)
۱۵۷	ب) قضیه مقدار اولیه: (ب)
۱۶۰	حل معادلات سیستم: (۶-۲-۴)
۱۶۱	نمایش عکس‌العمل سیستم: (۷-۲-۴)
۱۶۶	الف) بسط تابع تبدیل $G(s)$ «فاقد قطب تکراری» : (الف)
۱۶۶	ب) بسط تابع تبدیل $G(s)$ «دارای قطب‌های تکراری» : (ب)
۱۷۰	مسائل : (مسائل)

• فصل پنجم

پایداری سیستم‌های خطی

۱۷۹	مقدمه: (مقدمه)
۱۷۹	(۱-۵) مسیر حرکت سیستم در فضای متغیرهای حالت: (۱-۵)
۱۹۲	(۲-۵) پایداری حول نقطه تعادل: (۲-۵)
۱۹۶	(۳-۵) پایداری سیستم با ورودی: (۳-۵)
۱۹۷	(۴-۵) پایداری سیستم‌های خطی: (۴-۵)
۱۹۹	(۵-۵) تعیین پایداری سیستم خطی با استفاده از روش راوث: (۵-۵)
۲۰۷	مسائل : (مسائل)

• فصل ششم

کنترل فیدبک

۲	مقدمه: (مقدمه)
۲۱۱	(۱-۶) نمایش و ساختمان یک سیستم کنترل فیدبک: (۱-۶)
	الف) بررسی سیستم کنترلی «مدار باز» و «مدار بسته» با
۲۱۹	«ورودی مزاحم»: (۲-۱۹)
	ب) بررسی سیستم کنترلی «مدار باز» و «مدار بسته» یا «تغییر
۲۲۰	در پارامترها»: (۲-۲۰)
۲۳۰	(۲-۶) عکس‌العمل یا رفتار سیستم فیدبک : (۲-۶)
۲۳۲	(۱-۲-۶) خطای حالت ماندگار (e_{ss}) : (۱-۲-۶)
۲۳۶	(۳-۶) کنترلرهای خطی: (۳-۶)
۲۴۵	(۴-۶) روش مکان هندسی ریشه‌ها: (۴-۶)
۲۴۹	(۱-۴-۶) رسم مکان هندسی ریشه‌ها: (۱-۴-۶)

۵-۶	تحلیل کیفی مکان هندسی ریشه‌ها:	۲۵۲
۶-۶	تأثیر اضافه کردن «قطب» یا «صفر» در پایداری و رفتار سیستم:	۲۵۶
۷-۷	ترمیم مکان هندسی ریشه‌ها:	۲۵۸
۸-۶	کنترل فرایندها (تنظیم پارامترهای کنترل):	۲۵۸
۱-۸-۶	روش‌های زیگلر و نیکولز» برای تعیین پارامترهای	
۲۶۱	کنترل:	
۲۶۱	الف) روش اول (روش عکس‌العمل حالت گذرا):	
۲۶۲	ب) روش دوم (روش حساسیت مقدار نهایی):	

• فصل هفتم

عکس‌العمل فرکانسی

مقدمه:	۲۷۱
۱-۷ ورودی و خروجی سینوسی:	۲۷۲
۲-۷ رسم عکس‌العمل فرکانسی:	۲۷۶
۱-۲-۷ نمودار نایکویست:	۲۷۶
۲-۲-۷ نمودار «بود»:	۲۷۸
۳-۷ قضیه پایداری نایکویست:	۲۸۹
۴-۷ کاربرد قضیه پایداری نایکویست در مسائل مهندسی:	۳۰۲
الف) پایداری سیستم مدار بسته:	۳۰۲
ب) مرز پایداری در سیستم مدار بسته:	۳۰۲
ج) ناپایداری سیستم مدار بسته:	۳۰۳
۵-۷ طراحی سیستم کنترلی با استفاده از عکس‌العمل فرکانسی	
سیستم مدار باز:	۳۰۳
۶-۷ جبران‌کننده‌ها یا ترمیم‌کننده‌ها:	۳۰۸
۱ ۶ ۷ مدارهای تقدم فاز:	۳۰۸
۲-۶-۷ مدارهای تأخیر فاز:	۳۱۴

• پیوستها

پیوست ۱ ماتریس‌ها و عملیات ماتریسی:	۳۲۵
پیوست ۲ مقادیر ویژه و بردارهای ویژه:	۳۶۹
پیوست ۳ نمایش‌های مختلف برای توابع تبدیل رایج:	۴۰۵
پیوست ۴ مفاهیم کاربردی نرم‌افزار Matlab:	۴۲۱

پیوسته مثالهای حل شده با استفاده از نرم افزار Matlab ۴۳۳

پیوسته ۶ جدول تبدیلات لاپلاس ۴۴۳

• نمایه ۴۴۵

• منابع ۴۵۹

www.ketab.ir