

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس

# سیستم‌های کنترل بازنشان

ترجمه:

**دکتر نسترن واثق**

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

**علی دخت شکیب‌جو**

سر شناسنامه	: بانوس، آفونسو، ترجمه نسترن وائق، علی دخت شکیبجو.
عنوان و نام پدید آور	: <b>Banos, Alfonso</b> سیستم های کنترل باز نشان / مؤلف آفونسو بانوس، آنتونیو بار نیرو؛ ترجمه نسترن وائق، علی دخت شکیب جو.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۳۴۵ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹-۵۶-۶۵۹۴-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: قیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: [2012], <b>Reset control systems</b>
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: نظریه کنترل غیر خطی
موضوع	: سامانه های کنترل باز خورد - طرح و ساختمان
موضوع	: سیستم های نوردای زمان خطی
شناسه افزوده	: بار نیرو، آنتونیو، ۱۹۵۹- م.
شناسه افزوده	: <b>Barreiro, Antonio</b>
شناسه افزوده	: وائق، نسترن، ۱۳۵۷، <b>nastaran, vasegh</b> ، مترجم، دکتری
شناسه افزوده	: شکیب جو، علی دخت، ۱۳۵۶، <b>aledokht, shakibjoo</b> ، مترجم، فوق لیسانس
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۴ س ۹ / پ ۲ / <b>TJ۲۳۳</b>
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۸۱۵۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۱۷۹۵۷۲



عنوان	: سیستم های کنترل باز نشان
ترجمه	: دکتر نسترن وائق، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، علی دخت شکیب جو
ویراستار علمی	: دکتر سید زین العابدین موسوی
ویراستار ادبی	: عاطفه نجیبی
نوبت چاپ	: اول - بهار ۱۳۹۵
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	: فراتقش
چاپ	: فردوس
طراح جلد	: محمد دخت شکیب جو
ناظر چاپ	: محمد معتمدی نژاد
کارشناس چاپ و صفحه آرا	: نیره فیروزی
کارشناسان	: طاهره کیا/ علی رضایی اهوانویی
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۲۰,۰۰۰ تومان
شابک	: ۹-۵۶-۶۵۹۴-۶۰۰-۹۷۸
	: ISBN: 978-600-6594-56-9

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.  
 نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: (۲۶۳۲) ۰۹ - ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰، ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

# پیشگفتار مترجمین

حمد و سپاس پرودگار را که با الطاف بیکران خود، این توفیق را به ما ارزانی داشت که با ترجمه یکی از کتب ارزشمند علمی، گامی کوچک در ارتقای دانش این مرز و بوم برداریم.

با اینکه حدود یک قرن از طراحی اولین کنترل کننده‌ی بهره / انتگرال گیر / مشتق گیر می‌گذرد، این کنترل کننده هم‌چنان بیشترین کاربرد را در صنایع دارد. در این مدت روش‌های بسیاری برای تنظیم این کنترل کننده‌ی پیشنهاد شده است. اما در سیستم‌های خطی، وجود تأخیر و صفرهای ناپایدار، محدودیت‌های ناشی از رابطه فاز/ بهره و ... استفاده از این کنترل کننده را با مشکل مواجه می‌کند. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از کنترل بازنشان است. اگرچه ایده بازنشانی کنترل کننده در دهه ۱۹۵۰ مطرح شد، استفاده از آن تا ۱۹۹۰ رایج نشد. این امر به دلیل محدودیت‌هایی بود که در تحلیل سیستم‌ها با کنترل بازنشان وجود داشت. از دهه ۱۹۹۰ نویسندگان کتاب *سیستم‌های کنترل بازنشان* (که ترجمه آن هم‌اکنون در دست شماست) و همکارانشان روش‌هایی را برای تحلیل عملکرد ساختار بازنشان و ویژگی‌ها و نیز مثال‌هایی عملی از کاربردهای کنترل بازنشان ارائه دادند. چکیده نتایج کارهای این تیم تا ۲۰۱۲ به صورت کتاب مذکور درآمده است. شرح کاملی از آنچه به انجام رسیده در پیش‌گفتار مولفین آمده است.

یکی از انگیزه‌های مترجمین از ترجمه این کتاب، شاید ترویج این ایده است که برای حل مسائل پیچیده، همیشه راه‌حل‌های پیچیده بهترین انتخاب نیست. کتاب حاضر اولین کتابی است که به زبان فارسی به معرفی کنترل بازنشان می‌پردازد. امید است این کتاب گامی هر چند کوچک در معرفی روش‌های نوین اما ساده در علم کنترل به علاقمندان به ویژه دانشجویان کارشناسی ارشد، دکتری و پژوهشگران حوزه مهندسی کنترل باشد. چه بسا راه‌حل‌های ساده‌ای که در این کتاب برای غلبه بر محدودیت‌های اساسی کنترل ارائه شده، این خلاقیت را در مهندسان کنترل و دانش پژوهان این حوزه ایجاد کند تا برای غلبه بر مشکلات اساسی صنعت این کشور راه‌حل‌های ساده‌ای بیابند.

با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، متنی، ابهام و اشکالات موضوعی نیست. لذا از شما خواننده محترم تقاضا می‌شود در صورت مشاهده هرگونه اشکال و ایراد، مراتب را به اطلاع مترجمین برسانید. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر شما گرامیان قدردانی می‌کنیم.

در پایان فرصت را غنیمت شمرده، از آقای محمد دخت شکیب‌جو که در ویرایش متن و طراحی جلد کتاب و همچنین از کارکنان انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی که در مراحل مختلف چاپ کتاب همکاری نموده‌اند، تشکر می‌نماییم. همچنین از داورانی که مکرر متن کتاب را بازبینی کردند و در هر گام پیشنهادات ارزنده‌ای جهت بهبود این اثر ارائه دادند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نماییم.

**نسترن واثق**

**علی دخت شکیب‌جو**

## پیشگفتار نویسندگان

گرچه سیستم‌های کنترل بازنشان به سال ۱۹۵۸ با اثر کَلگ می‌باشد اما این موضوع دوران آغازین خود را می‌گذراند. اولین تلاش‌های هورویتز و همکارانش با تئوری ساخت جبران کننده‌های بازنشان همانند انتگرال‌گیر کَلگ و فور (عنصر بازنشان مرتبه اول) شروع شد. کمبودهای تئوری کنترل در آن زمان و همچنین مطرح بودن مساله‌های اساسی مانند خوش‌رفتاری و پایداری، روند پیشرفت نظری و کاربردهای کنترل کننده بازنشان را چندین دهه به تعویق انداخت. تا آنکه در اواخر دهه ۱۹۷۰ با تلاش‌های چیت، هولوت و همکارانش توسعه کنترل کننده‌های بازنشان آغاز شد که حاصل آن دستیابی به نتایج زیادی در زمینه سیستم‌های کنترل ترکیبی و کنترل ضربه‌ای در ارتباط با کنترل بازنشان بود. در دهه گذشته تحقیقات بسیاری از سوی گروه‌های بین‌المللی درباره کنترل بازنشان انجام گرفته است به این امید که بتوان از پتانسیل عظیم کنترل بازنشان در طراحی کنترل کننده و کاربردهای عملی آن بهره گرفت.

اولین آشنایی ما با موضوع کنترل بازنشان به هنگام بازدید اسحاق هورویتز از گروه ما در سپتامبر ۲۰۰۰ در اسپانیا صورت گرفت. در آن زمان ما بر روی نظریه فیدبک کمی غیرخطی تحقیق می‌کردیم که از جبران‌ساز خطی استفاده می‌کند. در جریان این بازدید بحث‌های مفیدی در زمینه مزایای استفاده از جبران‌ساز بازنشان - غیرخطی برای غلبه بر محدودیت‌های اساسی سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان بین ما انجام شد. کار ما به صورت جدی بر روی کنترل بازنشان از سال ۲۰۰۶ شروع شد. هدف ما ارائه نظریه‌ای مبتنی بر نظریه‌های پایه بوده که در این راه با تعریف ساختار جبران‌ساز و قوانین تنظیم برای آنها، مسائل کاربردی مانند کنترل فرآیند و کنترل از راه دور و به طور کلی سیستم‌هایی با تأخیر زمانی مورد توجه قرار گرفته است.

در فصل اول این کتاب ابتدا به معرفی سیستم‌های کنترل می‌پردازیم و سپس دو هدف را دنبال می‌کنیم. در آغاز به صورت مختصر شرح می‌دهیم کنترل بازنشان چیست و اینکه چرا و چه موقع این راهکار به کار رود. هدفی که در دو بخش اول به آن پرداخته می‌شود در این نکته کلیدی خلاصه می‌شود: کنترل بازنشان ساختار ساده غیرخطی است برای فرآیندهای خطی که با محدودیت‌های اساسی طراحی در دامنه زمانی و فرکانسی مواجه‌اند. هدف دوم فصل، بررسی اجمالی مقالاتی است که به تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل بازنشان پرداخته‌اند. پیشرفت کنترل بازنشان با معرفی انتگرال‌گیر کُگ و عنصر بازنشان مرتبه اول (فور) توسط هورویتز و همکارانش آغاز شد. علاوه بر آن، نتایج دقیق اولیه در مورد تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های بازنشان با استفاده از توصیف فضای حالت شامل جبران‌کننده‌های بازنشان کلی و جزئی بدست آمد. در این کتاب همچنین از دیدگاه‌های متفاوت ارتباط بین کنترل بازنشان و سیستم‌های کنترل ترکیبی و ضربه را در حوزه‌ای گسترده‌تر بررسی می‌کنیم.

در فصل دوم، سیستم کنترل بازنشان را تعریف می‌کنیم. همانند سیستم‌های ضربه، کنترل بازنشان ممکن است جواب‌های متفاوتی بخصوص در الگوهای پیچیده مانند ضربه، وقفه و زینو از خود نشان دهند. در روند کنترل، این نوع رفتار نوعی نقص به شمار می‌رود. بنابراین شرایط مختلفی برای خوش رفتاری سیستم‌های کنترل بازنشان مطرح می‌شود. به عبارت دیگر، ویژگی‌های مهم کنترل بازنشان با تحلیل زمان‌های بازنشان و تطبیق آن با شرایط اولیه بدست می‌آید. ارتباط این الگوها را با رویت‌پذیری و قابلیت دسترسی سیستم خطی پایه بررسی می‌کنیم.

فصل سوم به مساله پایداری سیستم‌های کنترل بازنشان با سیستم‌های پایه با بُعد محدود اختصاص دارد. در این فصل مساله پایداری از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل: ۱- پایداری داخلی یا لیاپانوف ۲- پایداری خارجی یا ورودی-خروجی با تحلیل غیرفعال و ۳- بررسی پایداری با روش تابع توصیفی. روش‌های پایداری داخلی به دو بخش تقسیم می‌شود: روش‌هایی که مستقیماً به زمان‌های بازنشان وابسته نیست و دیگری روش‌هایی که وابسته به زمان‌های بازنشان است. مورد اول مستقیماً با استفاده از تابع لیاپانوف زمان پیوسته بدست می‌آید (که منجر به شرط  $H\beta$  می‌شود) در حالی که مورد دوم (وابسته به زمان‌های بازنشان) به جداسازی مقادیر بعد از بازنشان و سپس تحلیل لیاپانوف زمان گسسته نیاز دارد. در ادامه پایداری ورودی-خروجی  $L_2$  را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و نتایجی در ارتباط با ویژگی‌های اتلافی و غیرفعال حلقه‌های فیدبک بازنشان ارائه می‌دهیم. در نهایت تابع توصیفی استاندارد برای پیش‌بینی تقریبی وجود یا عدم وجود نوسان استفاده می‌شود.

پایداری سیستم‌های کنترل بازنشان تأخیر زمانی در فصل ۴ مورد بحث قرار می‌گیرد. کنترل بازنشان قادر است محدودیت‌های اساسی را رفع کند و تأخیر زمانی نیز یکی از این محدودیت‌ها بشمار می‌رود. مساله پایداری با انتخاب تابع مناسب لیاپانوف-کراسوفسکی بررسی می‌شود و با وارد کردن آن، تابع می‌بایستی در مودهای بازنشان و پیوسته کاهش یابد. شرایط حاصله نامساوی‌های ماتریس خطی (LMI) را تشکیل می‌دهد که بسته به انتخاب نوع تابع، نامساوی‌های ماتریس خطی می‌تواند وابسته به تأخیر یا مستقل از تأخیر باشد. در هر دو مورد، نامساوی‌های ماتریس خطی که از شرایط پایداری دامنه زمانی حاصل شده‌اند با استفاده از ابزارهای مناسب مانند لم کالمن - یاکوبوویچ- پوپوف یا روش‌های غیرفعال به شرایط دامنه فرکانسی معادل تبدیل می‌شوند. سپس تحلیل مقاوم بدست آمده در شرایط دامنه فرکانسی برحسب قضیه بهره کوچک یا لم زیرسیستم حقیقی مثبت بیان می‌شود. در آخر با چندین مثال کاربرد شرایط پایداری و توانمندی‌های کنترل بازنشان در سیستم‌های تأخیر زمانی را نشان می‌دهیم.

در فصل ۵، جبران‌ساز بازنشان برای رفع محدودیت‌های جبران‌ساز خطی تغییرناپذیر با زمان استفاده می‌شود. در این فصل جبران‌ساز جدید بازنشان به اصطلاح  $PI + CI$  معرفی می‌کنیم. این جبران‌ساز با اضافه کردن انتگرال‌گیر کنگ به جبران‌ساز  $PI$  تشکیل می‌شود و هدف از آن بهبود پاسخ حلقه بسته با استفاده از مشخصه غیرخطی این عنصر است. در نتیجه بازنشانی درصدی از عبارت انتگرالی در جبران‌ساز  $PI$  می‌توان بهبود قابل توجهی با تنظیم جبران‌ساز  $PI$  بدست آورد مانند سیستم‌هایی با ثابت زمانی غالب یا سیستم‌های انتگرالی. هدف اصلی این فصل توسعه قواعد تنظیم  $PI + CI$  در محدوده کاربری وسیعتر برای سیستم‌های دینامیکی پایه شامل سیستم‌های مرتبه اول و بالاتر با تأخیر زمانی است. در ادامه بعضی از بهبودهای طراحی شامل استفاده از باندهای ثابت یا متغیر بازنشان، همراه با نظریه فیدبک کمی و استفاده از درصد بازنشان متغیر توضیح داده می‌شود. در فصل ۶، با کاربردهای عملی سیستم‌های بازنشان بر پایه جبران‌ساز  $PI + CI$  آشنا می‌شویم: سیستم کنترل دمای مبدل حرارتی، سیستم‌های کنترل از راه دور دو طرفه و سرانجام کنترل حرارتی کلکتور خورشیدی. کاربردهای اول و دوم در سیستم آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته است و مورد سوم نیز با شبیه‌ساز تأیید شده آزمایش شده است.

این کتاب خلاصه‌ای از تحقیقات گروه ما در طی ۵ سال است. این کار با همکاری خواکین کاراسکو، انجل ویدال، الخاندرو فرناندس، خوان اگناسیو مولیرو، سپاستین دورمیدو، خوزه

کارلوس مورینو، مانوئل برنجل و ارجان وندر شفت انجام شده است. در حقیقت هر یک از این همکاران سهم بسزایی در این مجموعه داشتند. ما همچنین از وزارت علوم و نوآوری (دولت اسپانیا) برای حمایتشان از پروژه مشترک DPI۲۰۰۴-۰۷۶۷۰، DPI۲۰۰۷-۶۶۴۵۵ و DPI۲۰۰۴۵۵ سپاسگزاری می‌کنیم. این کتاب شامل مقالاتی است که پیشتر در کنفرانس‌ها و مجلات انتشار یافته و در اینجا به صورت مجموعه‌ای کامل در اختیار مخاطبان قرار می‌گیرد. هدف این کتاب آشنایی با کنترل بازنشان و رویکردهای موجود به محققان کنترل و همچنین شناساندن روش‌های موثر برای غلبه بر محدودیت‌های اساسی جبران‌سازهای کلاسیک PI/PID به مهندسان کنترل است.

**آلفونسو بانوس**

**آنتونیو بارپرو**



# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه
۱	۱-۱ کنترل بازنشان چیست؟
۱۳	۲-۱ چرا کنترل بازنشان؟
۱۵	۱-۲-۱ غلبه بر محدودیت‌های اساسی در حوزه زمان
۱۹	۲-۲-۱ غلبه بر محدودیت‌ها در حوزه فرکانس
۳۱	۳-۱ ایده‌های اولیه در مورد کنترل بازنشان
۳۱	۱-۳-۱ کنترل بازنشان با انتگرال‌گیر کنگ
۳۵	۲-۳-۱ کنترل بازنشان با عنصر بازنشان مرتبه اول (فور)
۳۷	۴-۱ اولین رویکردهای کلی در تحلیل سیستم‌های کنترل بازنشان
۳۸	۱-۴-۱ راه‌اندازی کلی و پایداری مجانبی
۴۰	۵-۱ سیستم‌های بازنشان به عنوان سیستم‌های ضربه‌ای
۴۲	۱-۵-۱ نظریه معادلات دیفرانسیل ضربه‌ای
۴۵	۲-۵-۱ نظریه کنترل ضربه‌ای
۵۰	۳-۵-۱ سیستم‌های دینامیکی ضربه‌ای
۵۵	۶-۱ سیستم‌های بازنشان به عنوان سیستم‌های ترکیبی
۶۲	۷-۱ سایر نتایج درباره کنترل بازنشان
۶۳	۱-۷-۱ طراحی بر اساس عملکرد بهره‌ها $L_p$ و $\mathcal{H}_p$
۶۸	۲-۷-۱ طراحی بر اساس بهره $L_p$ و ورودی‌های مرجع غیر صفر
۷۰	۳-۷-۱ طراحی بر اساس زمان‌های بازنشان ثابت $t_k$
۷۴	۸-۱ نگاهی گذرا به فصل‌ها

<b>۷۷</b>	<b>فصل دوم – تعریف سیستم کنترل بازنشان و نتایج اساسی</b>
۷۷	۱-۲ پیش نیازها و تعریف مساله
۸۰	۱-۱-۲ جواب‌های سیستم کنترل بازنشان
۸۲	۲-۱-۲ مشخصه‌های فواصل بازنشان
۸۷	۲-۲ زینو، ضربه‌زنی و بن‌بست
۸۸	۱-۲-۲ خوش‌رفتاری: ضربه‌زنی و بن‌بست
۹۵	۲-۲-۲ جواب‌های زینو
۱۰۲	۳-۲ زمان‌های بازنشان و بُعد سطح پس از بازنشان
۱۰۳	$\dim(\mathcal{M}_{\mathcal{R}}) = 1$ ۱-۳-۲
۱۰۶	$\dim(\mathcal{M}_{\mathcal{R}}) = 2$ ۲-۳-۲
۱۱۲	$\dim(\mathcal{M}_{\mathcal{R}}) \geq 3$ ۳-۳-۲
۱۱۴	۴-۲ سیستم‌های کنترل بازنشان با ورودی‌های بیرونی
۱۱۷	۱-۴-۲ سیستم کنترل بازنشان خوش‌رفتار با ورودی بیرونی
۱۱۹	۲-۴-۲ سیستم کنترل بازنشان با جواب‌های زینو
<b>۱۲۵</b>	<b>فصل سوم – پایداری سیستم‌های کنترل بازنشان</b>
۱۲۵	۱-۳ مقدمه
۱۲۶	۲-۳ پایداری لیاپانوف
۱۲۷	۱-۲-۳ شرایط مستقل از زمان‌های بازنشان
۱۳۳	۲-۲-۳ معیار پایداری وابسته به زمان بازنشان
۱۴۱	۳-۲-۳ پایداری‌سازی سیستم‌های کنترل بازنشان
۱۵۲	۳-۳ سیستم‌های کنترل بازنشان با ورودی‌ها/ تحلیل غیرفعال بودن
۱۵۷	۱-۳-۳ جبران‌سازهای بازنشان کامل
۱۶۱	۲-۳-۳ جبران‌سازهای بازنشان جزئی
۱۶۵	۳-۳-۳ پایداری $\mathcal{L}_p$ سیستم کنترل بازنشان
۱۶۷	۴-۳-۳ مثال
۱۷۰	۴-۳ تحلیل تابع توصیفی
۱۷۱	۱-۴-۳ انتگرال‌گیر فور و کَلگ
۱۷۳	۲-۴-۳ جبران‌سازهای بازنشان با باند بازنشانی

۱۸۲	۳-۴-۳ تحلیل چرخه حدی
۱۸۵	۳-۴-۴ ارزیابی تابع توصیفی

### فصل چهارم - پایداری سیستم کنترل بازنشان تأخیر زمانی

۱۹۳	۱-۴ مقدمه
۱۹۵	۲-۴ انگیزه و بیان مساله
۲۰۱	۳-۴ شرایط بدون تاخیر در حوزه زمان
۲۰۴	۴-۴ شرایط بدون تاخیر در حوزه فرکانس
۲۰۵	۱-۴-۴ شرط $H_\beta$
۲۰۹	۲-۴-۴ شرط $H_\beta$ تعمیم یافته
۲۱۱	۳-۴-۴ تفسیر شرایط پایداری
۲۱۵	۵-۴ مثال: پایداری مستقل از تأخیر
۲۱۷	۶-۴ شرایط وابسته به تأخیر در حوزه زمان
۲۲۲	۷-۴ شرایط وابسته به تأخیر در حوزه فرکانس
۲۳۳	۸-۴ مثال: پایداری وابسته به تأخیر

### فصل پنجم - طراحی سیستم‌های کنترل بازنشان ۸

۲۳۷	۱-۵ جبران ساز PI + CI
۲۴۳	۱-۱-۵ تنظیم PI + CI برای سیستم‌های مرتبه اول
۲۴۷	۲-۱-۵ سیستم‌های تأخیر زمانی مرتبه اول
۲۵۷	۳-۱-۵ سیستم‌های مرتبه بالا
۲۶۱	۴-۱-۵ سیستم‌های انتگرال گیر
۲۶۴	۵-۱-۵ خلاصه قوانین تنظیم
۲۶۵	۲-۵ بهبودهای طراحی
۲۶۵	۱-۲-۵ باند بازنشان ثابت
۲۶۸	۲-۲-۵ باند بازنشان متغیر/ بازنشان پیشرفته
۲۶۹	۳-۲-۵ درصد بازنشان متغیر
۲۷۰	۴-۲-۵ طراحی کنترل مقاوم بر مبنای نظریه فیدبک کمی

<b>۲۷۳</b>	<b>فصل ششم - نمونه‌های کاربردی</b>
۲۷۳	۱-۶ کنترل دما در مبدل‌های حرارتی
۲۷۴	۱-۱-۶ مدل فرآیند
۲۷۹	۲-۱-۶ طراحی PI + CI
۲۹۰	۲-۶ کنترل از راه دور یک جرثقیل دروازه‌ای
۲۹۲	۱-۲-۶ کنترل‌کننده از راه دور غیرفعال و بررسی اجمالی سیستم
۲۹۵	۲-۲-۶ روش بازنشانی
۳۰۰	۳-۲-۶ مثال‌ها
۳۰۶	۳-۶ کنترل میدان‌های کلکتور خورشیدی
۳۰۸	۱-۳-۶ میدان کلکتور خورشیدی
۳۱۰	۲-۳-۶ طراحی کنترل‌کننده PI + CI
۳۱۴	۳-۳-۶ جبران‌ساز PI + CI با درصد بازنشان متغیر
<b>۳۱۹</b>	<b>فهرست منابع</b>
<b>۳۳۳</b>	<b>واژه‌نامه انگلیسی به فارسی</b>
<b>۳۳۹</b>	<b>فهرست الفبایی</b>