



دانشگاه شاهرود

ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی

(رشته مهندسی برق)

www.ketab.ir

مهندس ناصر حافظی مطلق

سرسنانه	حافظی مطلق، ناصر، ۱۳۵۹ -
عنوان و نام پدید آور	ابزار دقیق و اندازه گیری الکترونیکی / ناصر حافظی مطلق.
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	۲۹۸ ص.
فروست	دانشگاه پیام نور؛ ۲۳۲۸. گروه مهندسی برق؛ ۱۰ / آ.
شابک	978 - 964 - 14 - 0375 - 3
وضعیت فهرست نویسی	فیپا .
یادداشت	کتابنامه.
موضوع	ابزار و تجهیزات الکترونیکی - آموزش برنامه ای
موضوع	Electronic instruments - Programmed instruction
موضوع	ابزار اندازه گیری - آموزش برنامه ای.
موضوع	Measuring instruments - Programmed instruction
شناسه افزوده	دانشگاه پیام نور
شناسه افزوده	Payam Noor University
رده بندی کنگره	۱۳۵۰ الف ۴/ح ۲ TK7۷۸۷۸/۴
رده بندی دیویی	۶۲۱/۳ ۱۵۴
شماره کتابشناسی ملی	۱۴۳۰۰



ابزار دقیق و اندازه گیری الکترونیکی

مؤلف: مهندس ناصر حافظی، طاعت

ویراستار علمی: دکتر سید جواد جوادى مقدم

تهیه و تولید: دفتر تدوین و تولید کتب و محتوای آموزشی

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز چاپ و توزیع دانشگاه پیام نور

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

نوبت و تاریخ چاپ: چاپ اول بهمن ۱۳۹۵

شابک: ۳ - ۰۳۷۵ - ۱۴ - ۹۶۴ - ۹۷۸

ISBN: 978 - 964 - 14 - 0375 - 3

فروش این کتاب فقط از طریق نمایندگی های دانشگاه پیام نور مجاز می باشد و فروش

آن در سایر مراکز فروش کتاب موجب تعقیب قانونی فروشنده خواهد گردید

(کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر محفوظ و متعلق به دانشگاه پیام نور است. تولید، کپی یا خلاصه برداری، نشر و ترجمه، چاپ، افست، توزیع گسترده، تهیه CD و ... این اثر یا بخشی از آن اعم از متن، طرح پشت و روی جلد و ... بدون اخذ مجوز کتبی از معاونت فناوری و پژوهش دانشگاه خلاف مقررات و تعرض به حقوق مادی و معنوی دانشگاه است. متخلفین وفق قانون حمایت از مولفان و مصنفان و هنرمندان دارای مسئولیت حقوقی و کیفری بوده و تحت پیگرد قرار می گیرند.)

قیمت: ۱۲۵۰۰۰ ریال

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملل دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دوزخ با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد؟ در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از سوز عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه است. کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و زیبار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی جامعه و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان آه‌بار دهنده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخوشی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است. کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر بر سر این سطر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با مانت ارتقا سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان تحت‌ار را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلت اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نهاده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز رزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار نگارنده

نه

فصل اول: مفاهیم پایه در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی

۱

هدف کلی

۱

هدف‌های یادگیری

۱

مقدمه: معرفی سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی

۲

۱-۱-۱ نسل‌های سامانه‌های اندازه‌گیری

۲

۱-۱-۱-۱ سامانه‌های اندازه‌گیری مکانیکی

۳

۲-۱-۱ سامانه‌های اندازه‌گیری الکتریکی

۶

۳-۱-۱ سامانه‌های اندازه‌گیری الکترونیکی

۹

۲-۱-۱ مشخصه‌های ایستای عناصر تراگردان و سامانه‌های اندازه‌گیری

۱۱

۱-۲-۱ خطاهای ایستای اندازه‌گیری (عدم قطعیت)

۱۲

۲-۲-۱ انتشار عدم قطعیت (خطا)

۱۳

۳-۲-۱ صحت (درستی)

۲۲

۴-۲-۱ دقت

۲۳

۵-۲-۱ حساسیت ایستا

۲۴

۶-۲-۱ تکرارپذیری

۲۸

۷-۲-۱ میزان غیرخطی بودن

۲۹

۸-۲-۱ قابلیت تفکیک

۳۲

۹-۲-۱ پس‌ماند

۳۲

۳-۱-۱ مشخصه‌های پویای عناصر تراگردان و سامانه‌های اندازه‌گیری

۳۵

۱-۳-۱ سامانه‌های مرتبه صفر

۳۷

۲-۳-۱ سامانه‌های مرتبه اول

۳۸

۳-۳-۱ سامانه‌های مرتبه دوم

۴۵

۵۷	۳-۴ سامانه‌های تأخیر زمانی خالص
۵۹	۴-۱ قابلیت اطمینان در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی
۶۴	۵-۱ نوفه و اغتشاش در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی
۶۷	۶-۱ مشخصه‌های مهم در اندازه‌گیری
۷۰	خلاصه فصل اول
۷۱	مسائل فصل اول
۸۱	فصل دوم: حسگرها و عمل‌کننده‌ها در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی
۸۱	هدف کلی
۸۱	هدف‌های یادگیری
۸۱	مقدمه
۸۲	۱-۲ حسگرهای نوری و تابشی
۸۲	۱۲-۱ ماده از حسگرهای نوری و تابشی به منظور اندازه‌گیری دما
۸۴	۲-۲ سنسورهای نوری
۸۶	۲-۲-۲ مقاومت بسته به نور
۸۷	۲-۲-۲ دیود نوری
۹۱	۲-۲-۴ ترانزیستور
۹۳	۲-۲-۵ حسگرهای CCD
۹۴	۲-۲-۶ حسگرهای CMOS
۹۴	۳-۲ عمل‌کننده‌های نوری و تابشی
۱۰۱	۴-۲ حسگرهای صوتی
۱۰۶	۴-۲-۱ میکروفون زغالی
۱۰۷	۴-۲-۲ میکروفون دینامیکی
۱۰۷	۴-۲-۳ میکروفون کریستالی (بلورهای)
۱۰۸	۴-۲-۴ میکروفون نواری
۱۰۹	۴-۲-۵ میکروفون خازنی
۱۱۰	۵-۲ عمل‌کننده‌های صوتی
۱۱۳	۶-۲ حسگرهای جابه‌جایی
۱۱۵	۶-۲-۱ حسگرهای مقاومتی
۱۱۶	۶-۲-۲ حسگرهای خازنی
۱۱۹	۶-۲-۳ حسگرهای القایی
۱۲۴	۶-۲-۴ ترانسفورماتور تفاضلی خطی (LVDT) و ترانسفورماتور تفاضلی دورانی (RVDT)
۱۳۱	۶-۲-۵ سنکرو و ری‌زالور
۱۳۴	۶-۲-۶ کدکننده‌های نوری
۱۳۶	۷-۲ عمل‌کننده‌های جابه‌جایی
۱۳۷	۸-۲ حسگرهای تنش و کرنش
۱۳۹	۸-۲-۱ کرنش سنج

۱۴۴	۹-۲ حسگرهای نیرو
۱۴۴	۱-۹-۲ مقاومت حساس به نیرو
۱۴۵	۲-۹-۲ حسگر پیزوالکتریک
۱۴۹	۱۰-۲ حسگرهای دما
۱۵۰	۱-۱۰-۲ حسگرهای RTD
۱۵۱	۲-۱۰-۲ ترمیستور
۱۵۳	۳-۱۰-۲ تراشه‌های الکترونیکی اندازه‌گیری دما
۱۵۶	۴-۱۰-۲ ترموکوپل
۱۶۰	۱۱-۲ عمل‌کننده‌های دما
۱۶۱	۱۲-۲ حسگرهای مغناطیسی
۱۶۱	۱-۱۲-۲ حسگر اثر هال
۱۶۵	۲-۱۲-۲ حسگرهای مغناطونگش
۱۶۵	۳-۱۲-۲ پیکاپ
۱۶۷	۱۳-۲ حسگرهای مجاورت
۱۶۹	۱۴-۲ آشکارسازهای نوری
۱۶۹	۱-۱۴-۲ آشکارسازهای سولید (SL)
۱۷۲	۲-۱۴-۲ آشکارسازهای حرارتی (HT)
۱۷۳	۳-۱۴-۲ آشکارسازهای شتاب (SD)
۱۷۴	۴-۱۴-۲ آشکارسازهای گاز (GD)
۱۷۵	۱۵-۲ آشکارسازهای حضور
۱۷۵	۱۶-۲ حسگرهای RFID
۱۷۷	۱۷-۲ حسگرهای فشار
۱۷۸	۱۸-۲ حسگرهای سطح و تراز
۱۸۰	۱۹-۲ حسگرهای جریان و سرعت سیالات
۱۸۵	۲۰-۲ عمل‌کننده‌های جریان سیالات
۱۸۶	۲۱-۲ انتقال‌دهنده‌ها
۱۸۷	خلاصه فصل دوم
۱۸۹	مسائل فصل دوم
۱۹۵	فصل سوم: مدارهای کاربردی در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی
۱۹۵	هدف کلی
۱۹۵	هدف‌های یادگیری
۱۹۶	مقدمه
۱۹۶	۱-۳ پل‌های اندازه‌گیری
۲۰۸	۲-۳ مدارهای تقویت‌کننده
۲۱۰	۱-۲-۳ تقویت‌کننده‌های عملیاتی و ویژگی‌های آن‌ها
۲۱۲	۱-۲-۳ تقویت سیگنال با استفاده از تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۲۲۴	۳-۳ مدارهای مقایسه‌کننده
۲۲۷	۴-۳ مدارهای انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر
۲۳۱	۵-۳ پالایه‌های فعال
۲۳۳	۶-۳ مدارهای مولتی‌ویراتور
۲۳۷	۷-۳ کنترل‌کننده پیش‌فاز - پس‌فاز (لید - لگ)
۲۳۸	۸-۳ تقویت‌کننده لگاریتمی
۲۳۹	۹-۳ مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال و مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ
۲۴۰	خلاصه فصل سوم
۲۴۱	مسائل فصل سوم
۲۵۳	فصل چهارم: ۱. معرفی و تحلیل چند نمونه از سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی
۲۵۳	هدف کلی
۲۵۳	هدف‌های یادگیری
۲۵۳	مقدمه
۲۵۴	۱-۴ دستگاه رادار سنج
۲۵۶	۲-۴ دستگاه سنجش (د - ر)
۲۵۹	۳-۴ دستگاه پی‌اچ سنج
۲۶۲	۴-۴ رادار کاوشگر زمین (U. K.)
۲۶۵	۵-۴ دستگاه صداسنج (ترازسنج صوت)
۲۶۶	۶-۴ دستگاه فلزیاب
۲۶۹	۷-۴ دستگاه گشتاورسنج
۲۷۱	۸-۴ دستگاه نورسنج
۲۷۳	۹-۴ سامانه سونار
۲۷۸	۱۰-۴ سامانه اعلان حریق
۲۸۲	۱۱-۴ دستگاه دورسنج (تاکومتر)
۲۸۷	خلاصه فصل چهارم
۲۸۸	مسائل فصل چهارم
۲۸۹	پیوست: نمادها و نقشه‌خوانی ابزار دقیق
۲۹۷	مراجع

تقدیم به برنامه‌نویس خوشبختی، برادرم: خسرو
و به استادان بزرگوارم در دانشگاه فردوسی مشهد
جناب آقای دکتر مجید علومی و جناب آقای مهندس مجید شرکا

پیشگفتار نگارنده

به ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی، نه فقط به عنوان یک درس دانشگاهی بلکه باید به عنوان جانی - دانا پذیر از زندگی بشر امروز نگریست. شاخه‌های علوم مهندسی از جمله مهندسی برق، مهندسی پزشکی، مهندسی کامپیوتر، مهندسی صنایع، مهندسی شیمی، گرایش‌های مختلف مهندسی نفت و بسیاری دیگر از زیرشاخه‌های علوم فنی، همچنین صنایع گوناگون از صنایع نظامی، هسته‌ای، هوافضا، صنایع غذایی، صنایع سنگین و غیره، مجموعه فناوری‌های مربوط به صنایع خودرو به علاوه دستگاه‌های آزمایشگاهی در تمام شاخه‌های مختلف علوم و فناوری حاضر و حاضر محض و کاربردی بدون ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی ناکارآمد و ناتوان‌اند.

حتی زندگی عادی و روزمره انسان در عصر نیز بدون وسایل و دستگاه‌های برآمده از ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی دارای نقص و ناکارآمدی است.

کتابی که پیش روی شما است به عنوان کتاب درسی ابزار دقیق دانشجویان رشته مهندسی برق در دانشگاه پیام‌نور تهیه و آماده شده است ولی کاربردها و دامنه استفاده از آن می‌تواند بسیار فراتر از این باشد. ناگفته نماند که دامنه وسیع کاربردی این ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی پوشاننده اشکالات و نواقص احتمالی موجود در تألیف این کتاب نیست و نگارنده ضمن طلب پوزش پیشاپیش به واسطه هرگونه نقص و اشکال احتمالی در کتاب، دست تمامی صاحب‌نظران و منتقدان را به گرمی می‌فشارد و مشتاقانه منتظر شنیدن پیشنهادها و انتقادهای علاقه‌مندان است.

در تدوین این کتاب نهایت تلاش به عمل آمده که ضمن رعایت اختصار در بیان مطلب و پرهیز از توضیحات بیهوده در مطالب ارائه شده، جامعیت و کامل بودن مباحث مخدوش نشود. مثال‌های حل شده در متن فصل‌های کتاب به همراه تمرین‌های درون فصلی می‌تواند برای درک بهتر مطلب بسیار مفید باشند و در نهایت مسائل آخر هر فصل با رویکرد پوشش دادن مناسب به تمامی مباحث مطرح شده طراحی شده‌اند که دانشجویان محترم را در جهت یادگیری کامل‌تر

یاری دهند. همچنین نگارنده تمام تلاش خود را به عمل آورده که از واژگان معادل فارسی بهره گیرد و البته به منظور جلوگیری از سردرگمی خوانندگان معادل انگلیسی این واژگان نیز به صورت پاورقی ذیل همان صفحه ذکر شده‌اند. همچنین در مورد واژگان فارسی نوین که ممکن است بسیاری از خوانندگان پیش‌زمینه ذهنی کافی از آنان نداشته باشند، واژگان متداول قدیمی‌تر به تناوب و در جای‌جای متن در کنار واژه فارسی و در داخل پرانتز ذکر شده‌است.

ناگفته نماند که بر اساس رویکرد نوین و معاصر در طراحی و ساخت سامانه‌های ابزار دقیق، کنترل صنعتی و کنترل خودکار، مبنی بر بهره‌گیری بیشتر از اجزا و ساختارهای الکترونیکی و به کنار گذاشته شدن تدریجی سامانه‌های قدیمی‌تر مانند سامانه‌های مکانیکی اعم از هیدرلیک، پنوماتیکی و غیره و همچنین سامانه‌های الکتریکی، مباحث این کتاب نیز با تأکید بیشتر بر ساختارهای الکترونیکی نگاشته شده‌اند و اشاره به سایر سامانه‌ها و کاربردهایشان در درجه حداقل نیاز و فقط در حد لازم برای درک بهتر مطلب است و نه بیشتر.

فصول چهارم تا دهم کتاب به ترتیب به مفاهیم پایه در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی، حسگرها و عمل‌کننده‌ها در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی، مدارهای کاربردی در سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی و در نهایت معرفی و تحلیل چند نمونه از سامانه‌های ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی اشاره دارند.

در انتها لازم می‌دانم از مؤسسه علمی، دانش‌گستران فن‌آور پارت» به واسطه در اختیار قرار دادن مراجع مناسب حوزه ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی تشکر کنم. امید است مجموعه مباحث و مطالب ارائه‌شده در این کتاب بتواند راهگشایی هرچند کوچک برای دانشجویان و علاقه‌مندان حوزه سامانه‌های کنترل، صنعتی، کنترل خودکار، تجهیزات پزشکی، ابزار دقیق و اندازه‌گیری الکترونیکی باشد.

ناصر حاجی‌مافق

n_hafezi@um.ac.ir
www.um.ac.ir/~n-hafezi