

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مهندسی سازگاری
الکترومغناطیسی
(جلد ۳)



انتشارات
جهاد دانشگاهی
قزوین

سرشناسه: اوت، هنری، ۱۹۳۶-م.

Ott, Henry W.

عنوان و نام پدیدآور: مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی/تالیف هنری اوت ؛
ترجمه مصطفی مطاعی... [و دیگران].

مشخصات نشر: قزوین: جهاد دانشگاهی. سازمان انتشارات. واحد قزوین، ۱۳۹۹-
مشخصات ظاهری: ج.

شابک: ج. ۵۱-۲-۶۶۴۷۶-۶۲۲-۹۷۸؛ ج. ۷۲-۸-۶۶۴۷۶-۶۲۲-۹۷۸؛

ج. ۳-۰-۲-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸؛ ج. ۴-۷-۳-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸؛

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: عنوان اصلی: Electromagnetic compatibility engineering, c2009.

یادداشت: مترجمان مصطفی مطاعی، محمدحسین کوهی قمصری، امیرحسام
الفتی، مهسا شهرجردی.

موضوع: مدارهای الکترونیکی -- سرو صدا

موضوع: Electronic circuits -- Noise

موضوع: سازگاری الکترومغناطیسی

موضوع: Electromagnetic compatibility

شناسه افزوده: مطاعی، مصطفی، ۱۳۵۲-، مترجم

رده بندی کنگره: TK ۷۸۶۷/۵

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۸۲۲۴

شماره کتابشناسی ملی: ۶۱۶۵۱۶۹

وضعیت رکورد: فیپا

عنوان: مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (جلد ۳)

مترجمان: مصطفی مطاعی، امیرحسام الفتی، محمدحسین کوهی قمصری

و ایراستار: امیرحسام الفتی

شابک دوره: ۶۱-۸-۶۶۴۷۶-۶۲۲-۹۷۸

شابک جلد دوم: ۰-۲-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸

چاپ: نوبت اول - ۱۳۹۹

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

بها: ۸۰۰۰۰۰ ریال

مصوبه شورای شعبه انتشارات جهاد دانشگاهی قزوین

ناشر: انتشارات جهاد دانشگاهی قزوین

کلیه حقوق محفوظ است ©

مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (جلد ۳)

تألیف:

هنری اوت HENRY W. OTT

مترجمان:

مصطفی مطاعی

امیرحسام الفتی

محمد حسین کوهی قمصری

با مقدمه ای از: دکتر احمد چلداوی (استاد دانشگاه علم و صنعت)

دکتر محمد مهدی نایبی (استاد دانشگاه صنعتی شریف)

خدایا یاریمان کن

که سازگاری بین قطعات، ما را از سازگاری بین انسان‌ها غافل نکند.

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و فداکارمان

دانشجویان، پژوهشگران و صنعتگرانی که خالصانه برای سربلندی و

پیشرفت ایران اسلامی مان تلاش می‌کنند.

همکاری با صنعت و دانشگاه در

تدوین کتاب و مقاله، مشاوره و آموزش،

طراحی و ساخت سیستم‌ها بر اساس اصول EMC

مقدمه	۱
فصل ۱۱؛ توزیع تغذیه مدار دیجیتال	۱۵
۱-۱۱ پیوندزدایی منبع تغذیه	۱۸
۲-۱۱ جریان‌های گذرای منبع تغذیه	۱۹
۱-۲-۱۱ جریان‌گذرای بار	۲۰
۲-۲-۱۱ جریان داخلی پویا	۲۱
۳-۲-۱۱ تبدیل فوریه طیف جریان گذرا	۲۲
۴-۲-۱۱ جریان‌گذرای کل	۲۴
۳-۱۱ خازن‌های پیوندزدا	۲۵
۴-۱۱ راه‌حل‌های پیوندزدایی موثر	۲۹
۱-۴-۱۱ خازن‌های پیوندزدای چندگانه	۳۰
۲-۴-۱۱ خازن‌های چندگانه با مقادیر یکسان	۳۱
۳-۴-۱۱ خازن چندگانه با دو مقدار متفاوت	۳۴
۴-۴-۱۱ خازن‌های چندگانه با مقادیر مختلف	۳۷
۵-۴-۱۱ امیدانس هدف	۳۹
۶-۴-۱۱ ظرفیت میان صفحه‌ای PCB	۴۲
۷-۴-۱۱ جداسازی منبع تغذیه	۴۸
۵-۱۱ تاثیر پیوندزدایی بر انتشار تشعشعی	۵۰

۵۳	۶-۱۱ نوع و مقدار خازن پیوندزدا
۵۴	۷-۱۱ جایگذاری و نصب خازن پیوندزدا
۵۶	۸-۱۱ خازن پیوندزدا ی بزرگ
۵۷	۹-۱۱ صافی های ورودی تغذیه
۵۸	خلاصه
۵۹	مسائل
۶۱	مراجع
۶۲	منابع مطالعاتی
۶۳	فصل ۱۲: تشعشع مدار دیجیتالی
۶۷	۱-۱۲ تشعشع مد تفاضلی
۶۹	۱-۱-۱۲ سطح حلقه
۷۰	۲-۱-۱۲ جریان حلقه
۷۱	۳-۱-۱۲ سری فوریه
۷۳	۴-۱-۱۲ پوش انتشار تشعشعی
۷۴	۲-۱۲ کنترل تشعشع مد تفاضلی
۷۴	۱-۲-۱۲ طرح بندی برد
۷۷	۲-۲-۱۲ حلقه های خنثی ساز
۷۸	۳-۲-۱۲ پالس ساعت گسترده
۸۱	۳-۱۲ تشعشع مد مشترک
۸۶	۴-۱۲ کنترل تشعشع مد مشترک
۸۷	۱-۴-۱۲ ولتاژ مد مشترک
۸۸	۲-۴-۱۲ پوشش دار کردن و صافی کردن کابل
۹۱	۳-۴-۱۲ زمین های I/O مجزا
۹۵	۴-۴-۱۲ نگاهی به مباحث تشعشع مد مشترک
۹۵	خلاصه
۹۷	مسائل
۹۹	مراجع
۹۹	منابع مطالعاتی

۱۰۱.....	فصل ۱۳؛ انتشارات هدایتی.....
۱۰۴.....	۱-۱۳ امیدانس خط توان
۱۰۵.....	۱-۱-۱۳ شبکه تثبیت امیدانس خط
۱۰۷.....	۲-۱۳ منابع تغذیه کلیدزنی
۱۱۰.....	۱-۲-۱۳ انتشارات مد مشترک
۱۱۴.....	۲-۲-۱۳ انتشارات مد تفاضلی
۱۲۳.....	۳-۲-۱۳ مبدل های DC به DC
۱۲۳.....	۴-۲-۱۳ نویز دیود یکسوساز
۱۲۵.....	۳-۱۳ صافی های خط تغذیه
۱۲۶.....	۱-۳-۱۳ صافی کردن مد مشترک
۱۲۷.....	۲-۳-۱۳ صافی کردن مد تفاضلی
۱۲۷.....	۳-۳-۱۳ اندوکتانس نشستی
۱۳۱.....	۴-۳-۱۳ نصب صافی
۱۳۴.....	۵-۳-۱۳ منابع تغذیه با صافی های خط تغذیه یکپارچه روی برد
۱۳۵.....	۶-۳-۱۳ نویز فرکانس زیاد
۱۳۸.....	۴-۱۳ پیوند مد مشترک اولیه به ثانویه
۱۳۹.....	۵-۱۳ طیف گسترده فرکانسی
۱۳۹.....	۶-۱۳ ناپایداری منبع تغذیه
۱۴۰.....	۷-۱۳ انتشارات میدان مغناطیسی
۱۴۴.....	۸-۱۳ راه اندازه های موتور سرعت متغیر
۱۵۰.....	۹-۱۳ فرونشانی هارمونیک
۱۵۲.....	۱-۹-۱۳ صافی های ورودی سلفی
۱۵۳.....	۲-۹-۱۳ تصحیح کننده ضریب توان فعال
۱۵۴.....	۳-۹-۱۳ راکتورهای خط AC
۱۵۵.....	خلاصه
۱۵۷.....	مسائل
۱۵۹.....	مراجع
۱۵۹.....	منابع مطالعاتی

۱۶۱	فصل ۱۴: ایمنی RF و گذرا
۱۶۴	۱-۱۴ معیارهای کارکرد
۱۶۵	۲-۱۴ ایمنی RF
۱۶۶	۱-۲-۱۴ محیط RF
۱۶۷	۲-۲-۱۴ یک سوسازی صوتی
۱۶۸	۳-۲-۱۴ فنون کاهش RFI
۱۷۹	۳-۱۴ ایمنی گذرا
۱۸۰	۱-۳-۱۴ تخلیه الکتریسیته ساکن
۱۸۰	۲-۳-۱۴ پالس گذرای سریع الکتریکی
۱۸۱	۳-۳-۱۴ پالس های شدید صاعقه
۱۸۳	۴-۳-۱۴ شبکه های حذف گذرا
۱۸۴	۵-۳-۱۴ حذف پالس گذرای خط سیگنال
۱۸۸	۶-۳-۱۴ محافظت از خطوط سیگنال پر سرعت
۱۹۰	۷-۳-۱۴ حذف گذرای خط تغذیه
۱۹۵	۸-۳-۱۴ شبکه محافظت ترکیبی
۱۹۸	۴-۱۴ اختلال های خط تغذیه
۱۹۹	۱-۴-۱۴ منحنی ایمنی خط تغذیه
۲۰۱	خلاصه
۲۰۴	مسائل:
۲۰۶	مراجع
۲۰۷	منابع مطالعاتی
۲۰۹	فصل ۱۵: تخلیه الکتریسیته ساکن
۲۱۲	۱-۱۵ تولید الکتریسیته ساکن
۲۱۶	۱-۱-۱۵ باردار شدن القایی
۲۱۶	۲-۱-۱۵ ذخیره انرژی
۲۱۹	۲-۱۵ مدل بدن انسان
۲۲۳	۳-۱۵ تخلیه الکتریسیته ساکن
۲۲۳	۱-۳-۱۵ زمان زوال بار
۲۲۵	۴-۱۵ حفاظت در برابر ESD در طراحی تجهیزات

۲۲۹.....	۵-۱۵ جلویگیری از ورود ESD
۲۲۹.....	۱-۵-۱۵ محفظه‌های فلزی
۲۳۳.....	۲-۵-۱۵ اصلاح کابل I/O
۲۳۹.....	۳-۵-۱۵ محفظه‌های عایق
۲۴۳.....	۴-۵-۱۵ صفحه کلیدها و تابلوهای کنترلی
۲۴۴.....	۶-۱۵ مقاوم سازی مدارهای حساس
۲۴۴.....	۷-۱۵ زمین سازی ESD
۲۴۵.....	۸-۱۵ محصولات زمین نشده
۲۴۶.....	۹-۱۵ اختلال در اثر میدان القایی
۲۴۶.....	۱-۹-۱۵ پیوند القایی
۲۴۷.....	۲-۹-۱۵ پیوند خازنی
۲۴۹.....	۱۰-۱۵ طراحی نرم افزار مقاوم در برابر پالس‌های گذرا
۲۵۰.....	۱-۱۰-۱۵ آشکارسازی خطا در روند (جریان) برنامه
۲۵۲.....	۲-۱۰-۱۵ آشکارسازی خطاهای I/O
۲۵۲.....	۳-۱۰-۱۵ آشکارسازی خطاهای حافظه
۲۵۵.....	۱۱-۱۵ پنجره‌های زمان
۲۵۶.....	خلاصه
۲۵۸.....	مسائل
۲۶۰.....	مراجع
۲۶۰.....	منابع مطالعاتی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

هست کلید در گنج حکیم

مقدمه دکتر احمد چلداوی

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

علم عزت می بخشد، علم اقتدار است.

مقام معظم رهبری حضرت امام خامنه‌ای

سپاس خالق را سزد که نور ایمان و ولایت رسول اکرم و خاندان پاکش علیهم افضل صلوات المصلین را در دل‌های ما به امانت سپرد.

سپاس خدای را که بر ما منت نهاد و ما را در برهه‌ای از زمان خلق کرد که می‌توانیم در پرتو نظام مقدس جمهوری اسلامی به اعتلای دین او و نام مبارک امام زمان روحی و ارواح العالمین لتراب مقدمه الفداء خدمتی ولو ناچیز بکنیم.

افتخار ما این است که در قرآن ما عظمت جایگاه عالم با جملاتی مثل:

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

(۱۱ مجادله)

«خدا مقام اهل ایمان و دانشمندان شما را (در دو جهان) رفیع گرداند، و خدا به هر چه کنید آگاه است.»

به روشنی تبیین شده است.

در این راستا یکی از وظایف مهم ما به دست آوردن منشأ علوم و ایجاد تحول بنیادین در آن با استناد به جهان بینی الهی و استفاده از آن برای آسایش و رستگاری بشریت و رفع ستم‌ها و تبعیض‌ها در عرصه بین‌الملل است.

در همین راستا رهبر معظم انقلاب حضرت امام خامنه‌ای می‌فرمایند «خود علم ارزش است. این ارزش را کسانی می‌توانند به ضد ارزش تبدیل کنند که از آن علیه منافع بشریت استفاده کنند، اما خود دانش یک ارزش است، در این شک نکنید. به برکت دانش معرفت خدا هم آسان می‌شود.» بنابراین با الهام از آموزه‌های این دین بزرگ، فرهیختگان جامعه و به‌ویژه ما دانشگاهیان باید اولاً خودمان به این باور برسیم که «ما می‌توانیم»، ثانیاً باید این را به همه اقدار جامعه بباورانیم. تا خود به این باور قلبی برسیم قادر به باوراندن آن به دیگران نیستیم.

یکی از تلاش‌های مقدس در این زمینه تلاش برای ترجمه دانش و اندوخته‌های دیگران از زبان اصلی به زبان فارسی برای استفاده بهتر دانش‌پژوهان است. کتاب حاضر حاصل یکی از همین تلاش‌هاست که به خوبی و زیبایی توسط جناب آقای مهندس مطاعی که خود متخصص در زمینه سازگاری الکترومغناطیسی هستند، به زبان روان فارسی ترجمه شده است. به دلیل احاطه و تخصص مترجم، ترجمه متن از حالت تحت‌اللفظی خارج شده و به جملاتی با محتوای قوی تبدیل شده است. به نوبه خودم از تلاش‌های این متخصص متعهد و همکاران ایشان کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم و امیدوارم در عرصه‌های مشابه موفق باشند.

مقدمه دکتر محمد مهدی ناییبی

استاد دانشگاه صنعتی شریف

در شرایط کنونی که انواع و اقسام وسایل الکترونیکی در محیط کوچکی کنار هم کار می‌کنند به سادگی می‌توانند روی یکدیگر ایجاد تداخل نمایند. اگر مداری بدون علم به روش‌های سازگاری الکترومغناطیسی طراحی شود نمی‌تواند در محیط‌های واقعی و صنعتی درست کار کند. بارها شاهد این بوده‌ام که مهندسان فارغ‌التحصیل دانشگاه، مداری ساخته‌اند که در محیط آزمایشگاهی کار می‌کند ولی در محیط صنعتی رفتارهای عجیب و غریب از خود بروز می‌دهد. جای تأسف است که مهارت‌های کاربردی، از جمله این علم مهم، در دانشگاه‌های کشورمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که بدون دانستن اصول سازگاری الکترومغناطیسی معمولاً نمی‌توان یک مدار کارا و عملی ساخت.

علی‌رغم اینکه معروف شده که مهندسان EMC در نشر این علم بخیل‌اند و این فوت‌های کوزه‌گری را کمتر آموزش می‌دهند، کتب متعددی در این زمینه در جهان به چاپ رسیده است که بعضاً به‌عنوان مرجع درسی در برخی دانشگاه‌های جهان نیز مورد استفاده‌اند ولی برخی از این کتب بیش از اندازه تئوری بوده و فاقد نکات کاربردی بوده و برخی نیز در عین بیان نکات کاربردی فاقد استدلال‌های روشن علمی هستند. کتاب اوت تعادل دلپذیری در پرداختن به هر دو جنبه نظری و عملی این علم به کار بسته است. سال‌ها، قبل از اینکه اینجانب تدریس

این درس را در دانشگاه صنعتی شریف آغاز کنم، یعنی زمانی که خودم تازه لیسانس مهندسی الکترونیک را گرفته بودم و مرتب با مشکلات مربوط به تداخل در کارهای عملی مواجه می‌شدم، کتاب "تکنیک‌های کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی" که ترجمه ویرایش اول کتاب اوت بود به دستم رسید و افقی جدید بر من گشود و راه حل مشکلات را نشانم داد؛ لذا بعداً وقتی تدریس در دانشگاه را آغاز کردم لازم دیدم چنین درسی در میان دروس مهندسی برق ارائه شود. اکنون جای بسی تشکر است که جناب آقای مهندس مطاعی و همکارانشان نسبت به ترجمه ویرایش سوم کتاب بی‌نظیر آقای اوت که تغییرات اساسی نسبت به دو ویرایش قبلی دارد به زبان فارسی همت گماشته‌اند. اینجانب تمامی مشتاقان الکترونیک را به مطالعه این مجموعه ترغیب می‌نمایم.

مقدمه نویسندگان

مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی چاپ سوم کتاب قبلی ام با نام تکنیک‌های کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی است که به نظر می‌رسد نام‌گذاری مناسب‌تری باشد. ۹ فصل از ۱۲ فصل کاملاً بازنویسی شده‌اند. علاوه بر این، ۶ فصل جدید به همراه ۲ پیوست جدید با بیش از ۶۰۰ صفحه اضافه شده و تغییراتی شامل ۳۴۲ شکل جدید اعمال شده است. بیشتر این تغییرات مربوط به کاربردهای عملی نظریه مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی هستند که بر اساس تجربیاتم در مشاوره‌های EMC و ارائه همایش‌های آموزشی در بیش از ۲۰ سال گذشته حاصل شده‌اند.

بعضی از مشکلاتی که مهندسان طراح با آن مواجه شده‌اند باعث شده است که مباحث سازگاری الکترومغناطیسی و تطابق با مقررات تنظیمی با اهمیت شوند. بیشتر مهندسان برای کنترل این مشکلات به خوبی آماده نشده‌اند، زیرا این موضوعات در دانشکده‌های مهندسی تدریس نمی‌شوند. رفع مشکلات EMC غالباً توسط آزمایش و خطا که با درک کمی از نظریه‌ها همراه است صورت می‌گیرند. چنین تلاش‌هایی زمان بر بوده و اغلب، راه‌حل‌های خیلی خوبی نیستند. این وضعیت مایه تأسف است، زیرا بیشتر اصول مورد نیاز ساده هستند و می‌توانند توسط فیزیک مقدماتی توضیح داده شوند. هدف این کتاب اصلاح این وضعیت است.

این کتاب در مرحله اول برای مهندسانی است که با طراحی تجهیزات یا سیستم‌های الکترونیکی سروکار دارند و با مباحث EMC و تطابق‌های مقرراتی روبرو هستند. این کتاب جنبه‌های کاری مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی شامل ایمنی و انتشار را در بر می‌گیرد. مفاهیم مطرح شده

در این کتاب برای هر دو مدارات آنالوگ و دیجیتال با فرکانس‌های کمتر از فرکانس‌های صوتی تا GHz کاربرد دارند. تأکید ما بر طراحی‌های EMC به‌صرفه با کمترین پیچیدگی‌های ریاضیات است. خواننده بهتر است دانش لازم برای طراحی تجهیزات الکترونیکی سازگار با محیط الکترومغناطیسی را کسب کرده و از آیین‌نامه‌های EMC ملی و بین‌کشوری پیروی کند.

این کتاب به‌گونه‌ای نوشته شده است که به‌راحتی به‌عنوان یک کتاب درسی برای دانشجویان سال‌های آخر کارشناسی و نیز دانشجویان کارشناسی ارشد استفاده شود. برای این منظور، این کتاب ۲۵۱ مسئله برای دانشجویان دارد که جواب‌های آنها در پیوست "ه" آمده است.

کتاب به دو بخش تقسیم شده است: بخش اول، از فصل‌های ۱ تا ۱۰ در مورد نظریه EMC بوده و بخش دوم، از فصل ۱۱ تا ۱۸ شامل کاربردهای EMC است. علاوه بر این، کتاب دارای ۶ پیوست با اطلاعات تکمیلی است. سازمان‌بندی کتاب به‌صورت زیر است:

- فصل ۱ مقدمه‌ای بر سازگاری الکترومغناطیسی را بیان کرده و مقررات EMC ملی و بین‌کشوری را پوشش می‌دهد. که شامل مقررات اتحادیه اروپا، FCC و نظامی ایالات متحده هستند.
- فصل ۲ پیوند میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و هم‌شنوایی بین کابل‌ها و همین‌طور زمین‌سازی و پوشش کابل‌ها را در بر دارد. فصل ۳ شامل زمین‌سازی ایمنی، تغذیه، سیگنال و سخت‌افزار (سیستم‌ها) می‌شود.
- متعادل‌سازی و صافی‌سازی و همین‌طور پیوندزدایی تقویت‌کننده‌های تفاضلی و مدارات آنالوگ فرکانس کم در فصل ۴ بحث شده‌اند. فصل ۵ در مورد قطعات غیرفعال بوده و مشخصه‌های غیر آرمانی قطعاتی که بر کارکردشان مؤثر است را شامل می‌شود. علاوه بر مقاومت‌ها، خازن‌ها و القاگرها و مهره‌های فریت، هادی‌ها و خطوط انتقال نیز بیان شده‌اند.
- فصل ۶ تحلیل کارایی پوشش ورقه‌های فلزی، همین‌طور پوشش‌های هادی در پلاستیک و تأثیر شکاف‌ها بر کارایی پوشش را با جزئیات بیشتر بیان می‌کند.
- فصل ۷ محافظت از کنتاکت‌های رله‌ها و کلیدها را شامل می‌شود. فصل‌های ۸ و ۹ منابع نویز داخلی در عناصر و قطعات فعال را بررسی می‌کنند. فصل ۸ منابع نویز داخلی مانند نویز ضربه‌ای و حرارتی را شامل شده و فصل ۹ منابع نویز در قطعات فعال را بحث می‌کند.
- فصل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ مباحث سازگاری الکترومغناطیسی در مدارهای دیجیتال را شامل می‌شوند. فصل ۱۰ زمین‌سازی مدارات دیجیتال شامل امپدانس صفحه زمین را بررسی کرده و بحثی در مورد چگونگی جاری شدن جریان‌های منطق دیجیتال ارائه می‌کند.

- فصل ۱۱ در مورد توزیع و پیوندزدایی تغذیه مدار دیجیتال است و فصل ۱۲ سازوکارهای تشعشی مدارات دیجیتال را در هر دو مد مشترک و تفاضلی را شامل می‌شود.
- فصل ۱۳ انتشارات هدایتی در خطوط تغذیه جریان متناوب جریان (ac)، جریان مستقیم (dc) و همین‌طور مباحث EMC در منابع تغذیه کلیدزنی و راه‌اندازهای موتوری با سرعت متغیر را توضیح می‌دهد. فصل ۱۴ ایمنی گذرا و فرکانس رادیویی (RF) و همین‌طور محیط الکترومغناطیسی را بحث می‌کند. فصل ۱۵ محافظت در برابر تخلیه الکتروسیسته ساکن در طراحی محصولات الکترونیکی را شامل می‌شود. این فصل بر اهمیت یک رویکرد سه‌جانبه شامل طراحی نرم‌افزاری، الکتریکی و مکانیکی تأکید دارد.
- فصل ۱۶ طرح‌بندی برد مدار چاپی و انباشت لایه‌ها را شامل می‌شود که اغلب بحث نمی‌شوند. فصل ۱۷ مسئله مشکل بخش‌بندی، زمین‌سازی و طرح‌بندی بردهای مدار چاپی سیگنال ترکیبی را ارائه می‌کند.
- فصل پایانی (فصل ۱۸)، اندازه‌گیری‌های پیش‌تطابق EMC را بیان می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند در آزمایشگاه توسعه محصول، با استفاده از تجهیزات آزمون ارزان و ساده که به کارکرد EMC محصول وابسته هستند، انجام شوند.

در انتهای هر فصل، خلاصه‌ای از نکات مهم بحث شده و همین‌طور مسائل زیادی برای کمک به خواننده بیان شده است. برای تکمیل موضوعات مورد بحث، به هر فصل یک بخش مرجع و بخش مراجع بیشتر اضافه شده است.

اطلاعات تکمیلی تر در ۶ پیوست بیان شده‌اند. پیوست الف در مورد دسی‌بل است. پیوست ب، ۱۰ روش بهینه برای بیشینه کردن انتشار از محصول را شامل می‌شود. پیوست ج معادلاتی برای بازتاب‌های چندگانه میدان مغناطیسی در پوشش‌های نازک را استخراج می‌کند. پیوست د با عنوان دوقطبی برای افراد مبتدی، بحث ساده و مفهومی از چگونگی کارکرد یک آنتن دوقطبی است. اگر محصولی انرژی الکترومغناطیسی را تشعشع یا دریافت کند، آنتن است. بنابراین، درکی از نظریه آنتن پایه برای همه مهندسان، به‌ویژه مهندسان EMC سودمند خواهد بود. پیوست "و" نظریه مهم اندوکتانس جزئی که به‌خوبی درک نشده است را شرح می‌دهد و پیوست "ه" جواب‌های مسائل انتهای هر فصل را بیان می‌کند.

جا دارد در اینجا از همه کسانی که با وقت‌گذاشتن جهت ارائه نظرات در کتاب فنون کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی به من کمک کردند و همه‌آنهايي که من را در نوشتن کتاب مهندسی

سازگاری الکترومغناطیسی تشویق کردند تشکر و قدردانی کنم. به ویژه، از جان سلی، باب جرمن، دکتر کلایتون پاول، مارک استفکا و جیم براون برای مرور عمیق بخش‌های اصلی کتاب و همین‌طور برای تشویق‌های آنها و بحث‌های مفیدی که در مورد موضوعات EMC داشتیم، قدردانی کنم. مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی به خاطر آنها کتاب بهتری شده است.

بخش‌هایی از کتاب در کلاس سازگاری الکترومغناطیسی توسط مارک استفکا در دانشگاه میشیگان - داربون در نیمسال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ تدریس شد. تشکر قلبی‌ام را نثار دانشجویانی می‌کنم که در آن دو کلاس با تعداد زیادی از نظرات و پیشنهادات (که بسیاری از آنها به این کتاب اضافه شد) من را یاری کردند؛ به ویژه پیشنهادهایی که در مورد اضافه کردن مسائل به کتاب بیان داشتند. من همچنین مایلم از جیمز استایلز قدردانی کنم. مارک استفکا و من اغلب نکات سودمند ایشان را تأیید می‌کردیم.

در پایان، از همه همکارانی که زمان گذاشتند و بخش‌های مختلف این کتاب را مرور کرده و نظرات و پیشنهادات سودمندی داشتند، سپاسگزار می‌کنم.

اطلاعات فنی بیشتر، اطلاعات به روز در مورد مقررات EMC، همین‌طور غلط‌نامه در تارگه www.hotconsultants.com موجود است.

Livingston, New Jersey

HENRY W. OTT, January 2009

مقدمه مترجمان

بارهای الکتریکی ساکن باعث ایجاد میدان الکتریکی ساکن می‌شوند، حرکت یکنواخت بارها (جریان الکتریکی ثابت)، میدان مغناطیسی ساکن ایجاد می‌کند و حرکت شتاب‌دار بارها (جریان الکتریکی متغیر) موجب میدان‌های الکترومغناطیسی شده که در شرایط خاصی می‌توانند مانند یک آنتن خوب تشعشع کنند. بر اساس نظریه الکترومغناطیس، میدان‌های الکترومغناطیسی، ولتاژها یا جریان‌هایی را در مدارات القا می‌کنند و برعکس، ولتاژها و جریان‌ها می‌توانند میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف خود ایجاد کنند. از طرفی، نویز، یک جریان، ولتاژ یا میدان الکترومغناطیسی ناخواسته است. بنابراین کاهش نویز، در واقع کاهش میدان‌های الکترومغناطیسی یا ولتاژها و جریان‌های مزاحم در سیستم‌ها است.

امروزه کلیه این مباحث با عنوان **سازگاری الکترومغناطیسی**^۱ مطرح هستند. برای این منظور قبلاً از عبارات **تداخل الکترومغناطیسی**^۲ یا **تداخل فرکانس رادیویی**^۳ استفاده می‌شد؛ ولی امروزه از واژه مثبت **سازگاری** به جای **تداخل** استفاده می‌شود.

اهمیت موضوع EMC در سه دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. برای پی‌بردن به اهمیت موضوع EMC کافی است به این نکته اشاره کرد که **در اغلب کشورهای دنیا اگر یک محصول**

1 - EMC: ElectroMagnetic Compatibility

2 - EMI: ElectroMagnetic Interference

3 - RFI: Radio Frequency Interference

برقی (حتی یک اسباب بازی الکترونیکی)، استاندارد EMC نداشته باشد، اجازه فروش نخواهد داشت؛ هرچند پیشرفته‌ترین روش‌های طراحی در آن به کار رفته باشد. از دلایل دیگر اهمیت موضوع EMC، گزارش‌های بسیاری در مورد حوادث ناشی از عدم رعایت اصول EMC است:

سقوط هواپیماهای نظامی به علت عدم رعایت اصول EMC

سال	هواپیمای نظامی	علت حادثه
۱۹۴۴	B29	تشعشع و هدایت از کابل تغذیه به تجهیزات مخابراتی HF و VHF
۱۹۴۷	B50	ضعف اتصالات و زمین
۱۹۵۰	B37, C97	نویز گذرگاه تغذیه‌ی DC
۱۹۵۴	B52	تداخل از رادار به تجهیزات مخابراتی

حوادث ناشی از تخلیه الکتروسیسته ساکن (یکی از مباحث EMC)

سالانه بیلیون‌ها دلار به علت خسارت ناشی از تخلیه الکتروسیسته ساکن ESD هدر می‌رود.
حدود ۶۰٪ خرابی قطعات الکترونیکی ناشی از ESD است.
۱۷۶ مورد آتش‌سوزی ناشی از ESD در پمپ‌بنزین‌های چند شهر در آمریکا (۲۰۱۰-۱۹۹۲)
حوادث بسیاری از قبیل آتش‌سوزی، سقوط یا اختلال در هواپیما، موشک، خودرو، ... ناشی از ESD.

متأسفانه برخی از مدیران صنایع، EMC را جدی نمی‌گیرند و اغلب این عقیده را دارند که تاکنون محصولاتمان آزمون‌های کارکردی را با موفقیت گذرانده و بنابراین نیازی به پرداختن به مقوله EMC نداریم! این عقیده را می‌توان با سؤالات زیر پاسخ داد:

- آیا ما هم باید شکست‌های پیش‌آمده را تجربه کنیم؟!
- آیا هواپیماهای نظامی که به علت عدم رعایت الزامات EMC سقوط کرده‌اند، قبلاً آزمون‌های پروازی موفق نداشته‌اند؟!
- آیا با چند آزمون موفق در زمان صلح (یعنی زمانی که هیچ تهدید الکترومغناطیسی مطرح نیست) می‌توان نتیجه گرفت که هواپیما، پرتابه یا سیستم مورد نظر در برابر تهدیدات الکترومغناطیسی مقاوم است؟!

- آیا جهت جلوگیری از تکرار حوادثی که اشاره شد، نباید اقداماتی صورت پذیرد؟!
- آیا کارکرد محصولات در شرایط عادی کافی است و ایمنی، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی مهم نیستند؟!
- چرا آزمون‌های محیطی مانند دما و رطوبت را بدون شک می‌پذیریم ولی در آزمون‌های EMC؟!....

آری، یک نویز ساده گاهی با ایجاد بازخورد مثبت می‌تواند همانند یک گلوله بهمنی، بسیار مخرب باشد. به همین دلیل است که از بیش از ۵۰ سال قبل شرکت‌ها و مؤسساتی در اغلب کشورها تأسیس شده و به مشاوره، آموزش و ارائه تجهیزات در خصوص EMC می‌پردازند.

امروزه در اغلب کشورها موضوع EMC به یک فرهنگ عمومی تبدیل شده و حتی در این خصوص فیلم و کارتون‌هایی می‌سازند که کودکان و نوجوانان و عموم جامعه را با ضررهای تشعشعات الکترومغناطیسی بر انسان‌ها، محیط زیست و ابزارهای الکترونیکی آشنا سازند؛ لذا جا دارد که مراکز صنعتی و تحقیقاتی ما به‌ویژه مراکز حساس و حیاتی مانند تولیدکنندگان تجهیزات پزشکی، صنایع نظامی، شرکت‌های حمل‌ونقل، نفت و گاز، ارتباطات،... این موضوع را با جدیت بیشتر دنبال کنند تا شاهد خسارت‌های جانی و مالی هنگفت نشویم.

یکی از افراد پیشرو در این خصوص آقای هنری اوت است که با انتشار کتاب و مقاله و ارائه همایش‌های آموزشی EMC توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

آقای اوت کتاب معروفش را در سال ۱۹۷۶ با عنوان *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems* منتشر کرد. این کتاب، حاصل کارگاه‌های آموزشی آقای اوت در آزمایشگاه‌های بل بوده و از لحاظ نکات کاری حائز اهمیت است. تارگه‌آمازون، این کتاب را پرفروش‌ترین کتاب در این خصوص معرفی کرده و در برخی از تارگه‌ها از آن به کتاب مقدس در زمینه EMC یاد شده است. استانداردها، کتاب‌ها و مقالات بسیاری به این کتاب به‌عنوان مرجع اشاره کرده‌اند. این کتاب به چندین زبان زنده دنیا ترجمه شده است.

به علت استقبال بی‌نظیر از این کتاب، آقای اوت ویرایش دوم آن را با حدود ۴۰٪ افزایش مباحث (فصل ۱۰؛ نویز مدار دیجیتال و طرح‌بندی، فصل ۱۱؛ تشعشع مدارات دیجیتال، فصل ۱۲؛ تخلیه الکترونیسته ساکن و پیوست "ه" رویه‌های آزمون سازگاری الکترومغناطیسی) در سال ۱۹۸۸ منتشر کرد. این کتاب توسط بنده و همکاران ترجمه شد و در سال ۱۳۸۹ توسط انتشارات

دیبگران تهران به چاپ رسید که مورد استقبال خوبی توسط اساتید دانشگاه ها و کارشناسان صنایع واقع شده و به چاپ سوم رسید.

هنگام ترجمه ویرایش دوم کتاب با ابهاماتی مواجه شدیم که با برخی اساتید و همچنین آقای اوت در میان گذاشتیم و پس از کسب راهنمایی‌های ایشان، نتیجه مربوطه را در کتاب اعمال کردیم.

تقریباً هم‌زمان با چاپ ترجمه ویرایش دوم کتاب، آقای اوت با ارسال رایانامه‌ای به ما خبر چاپ ویرایش سوم کتابش را البته با عنوان جدید **مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی** اطلاع دادند. این کتاب را خریداری و با تعدادی از کارشناسان اقدام به ترجمه آن کردیم.

علت طولانی شدن ترجمه‌ها این بوده که هدف، ارائه‌ی یک ترجمه تحت‌اللفظی نبوده و بعضاً برای درک مفهوم یک جمله ساعت‌ها به بحث و تبادل نظر می‌پرداختیم و گاهی به چند دانشگاه یا مرکز علمی مراجعه می‌کردیم تا با مباحثه بیشتر با اساتید بتوانیم نه تنها یک کتاب با ترجمه خوب ارائه کنیم بلکه بتوانیم در مشاوره‌ها و دوره‌های آموزشی EMC که غالباً بر اساس همین کتاب (و همچنین چند مرجع دیگر که ترجمه‌ی آنها را هم‌زمان شروع کرده‌ایم) ارائه می‌کنیم، پاسخ‌گوی نیاز صنایع و مهندسان طراح باشیم.

چون ترجمه این کتاب بیش از ۱۰۰۰ صفحه شد، لذا تصمیم گرفتیم تا هر ۵ فصل آن در قالب یک جلد چاپ کنیم تا علاوه بر کاهش هزینه‌ها، هر شخصی با توجه به موضوع مورد نظر جلد مربوطه را تهیه کند.

در ویرایش دوم کتاب بیشتر به مشکلات نویز مدارات کاری با فرکانس کم تا متوسط (فرکانس‌های صوتی تا VHF) تأکید شده است، زیرا در این خصوص مباحث مستند کمتری وجود دارد. در ویرایش سوم حدود ۵۰٪ به آن مباحث اضافه شده که در مقدمه نویسنده مشخص شده‌اند.

این مجموعه ۴ جلدی مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) برای دانشجویان کلیه گرایش‌های برق (چراکه نویز در همه سیستم‌های الکترونیک، مخابرات، قدرت، کنترل، مهندسی پزشکی و کامپیوتر مؤثر است) به‌ویژه جهت دروس EMC، یکپارچگی سیگنال، طراحی مدارات آنالوگ و دیجیتال (کم‌نویز)، طراحی مدارات فرکانس زیاد، طراحی منابع کلیدزنی و... مفید است. همچنین طراحان و تعمیرکاران سیستم‌های الکترونیک برای رفع مشکل نویز سیستم‌هایشان و نیز جهت رعایت یا دریافت استانداردهای EMC، مخاطب این کتاب‌ها هستند.

بسیار خرسند خواهیم شد، اگر نظرات، پیشنهادات و اشکالات این کتاب را برای ما ارسال کنید (mota@iran.ir). همچنین جهت اطلاع از اصلاحات کتاب، دوره‌های آموزشی و اخبار و اطلاعات جدید در این خصوص می‌توانید به تارگه www.kim-co.ir یا www.motaei.blogfa.com مراجعه فرمایید. در اینجا فرصت را غنیمت شمرده و از کلیه دانشجویان و کارشناسانی که مایل اند در خصوص EMC، کتاب، مقاله یا پایان‌نامه ارائه کنند **دعوت به همکاری** کنیم. باعث افتخار است اگر بتوانیم همکاری مفید و مؤثری داشته باشیم.

تخلیه الکتریسیته ساکن (ESD) – که در جلد ۴ مطرح شده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقالات و گزارشات متعددی با موضوع **تلفات جانی و خسارت‌های پنهان بلیون دلاری به سیستم‌های الکترونیکی و انفجاری ناشی از تخلیه الکتریسیته ساکن** منتشر شده است. به‌ویژه در سیستم‌های دیجیتال تأکید می‌شود که مراقب باشید مدارتان به علت نویز ناشی از ESD یا سایر پالس‌های گذرا، به‌طور ناخواسته فرمانی را صادر نکند. گاهی یک فرمان ناخواسته مانند فرمان شلیک یک موشک یا فرمان فعال شدن کیسه هوای خودرو،... می‌تواند فاجعه جانی و مالی جبران‌ناپذیری به بار آورد. بنابراین دست‌کمی از اطلاعات در خصوص ESD و راه‌کارهای محافظت در برابر آن برای همه طراحان سیستم‌های الکترونیکی و مواد سوختی و قابل اشتعال یا انفجاری ضروری است.

در پایان لازم است از اساتید گرامی جناب آقای دکتر احمد چلداوی و جناب آقای دکتر محمد مهدی نایی به خاطر راهنمایی‌ها و تشویق‌هایشان، از مدیر محترم انتشارات جهاد دانشگاهی جناب آقای دل‌زنده و همکاران ایشان، از اساتید و دانشجویان مرکز تحقیقات آفاق دانشگاه علم و صنعت و پژوهشکده فن‌آوری مخابرات و الکترومغناطیس کاربردی دانشگاه امیرکبیر به خاطر بحث‌های علمی مفیدی که داشته‌ایم، از خانم مهندس طاهره رضایی برای همکاری در ویرایش بخش‌های مختلف کتاب بخصوص فصل ۱۳ و اسلایدهای آموزشی و خانم مهندس سهیلا اسماعیلی برای همکاری در ترجمه فصل‌های ۴، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۴ کمال تشکر و قدردانی را به عمل آوریم.

مصطفی مطاعی
و همکاران

توزیع تغذیه مدار دیجیتال

فصل ۱۱

همان طور که در فصل ۴ بیان شد، مشخصات یک سیستم ایده‌آل توزیع توان جریان مستقیم به شرح زیر است:

۱- تامین ولتاژ dc ثابت برای بار

۲- عدم انتشار نویز ac تولید شده توسط بار

۳- داشتن امپدانس ac صفر اهم بین تغذیه و زمین

در حالت ایده‌آل، طرح‌بندی^۱ توزیع تغذیه باید مشابه و موازی سیستم زمین باشد که از نظر عملی، همیشه ممکن یا لازم نیست. شبکه تغذیه یا سیستم توزیع تغذیه صفحه‌ای اگرچه مطلوب است اما به مهمی سیستم زمین مناسب نیست زیرا نویز منبع تغذیه می‌تواند توسط پیوندزدایی مناسب منبع تغذیه کنترل شود. اگر مصالحه لازم باشد، بهتر است فضای در دسترس برد برای ایجاد بهترین سیستم زمین ممکن به‌کار رود و کنترل نویز منبع تغذیه توسط روش‌های دیگر صورت پذیرد.

برخی از نویسندگان به مزایای حذف صفحات تغذیه از برد مدار چاپی (PCB) تاکید داشته‌اند^۲.

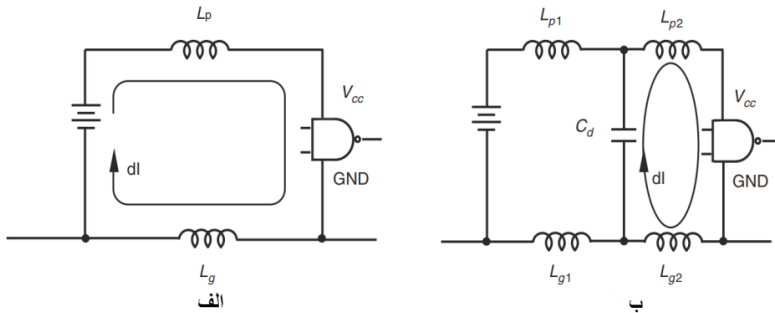
1- Layout

2- Leferink and van Etten 2004, Janssen 1999

۱-۱۱ پیوندزدایی منبع تغذیه

پیوندزدایی منبع تغذیه یکی از ابزارهای لازم برای جداکردن مدار از گذرگاه تغذیه مدار است که دو اثر مهم زیر را ایجاد می‌کند:

- ۱- کاهش اثر مدارات مجتمع بر یکدیگر (پیوندزدایی بین تراشه‌ها)
- ۲- ایجاد امپدانس کم بین تغذیه و زمین به طوری که هر تراشه مطابق نظر طراحان عمل کند (پیوندزدایی درون تراشه)^۲.



شکل ۱-۱۱ جریان‌گذرای تغذیه (الف) بدون خازن پیوندزدا (ب) با خازن پیوندزدا

هنگام کلیدزنی **دروازه منطقی**^۳، جریان گذرای dI در سیستم توزیع تغذیه مطابق شکل ۱-۱۱ الف ایجاد می‌شود. این جریان گذرا از هر دو مسیره‌های زمین و تغذیه می‌گذرد. این جریان گذرا که از اندوکتانس‌های تغذیه و زمین می‌گذرد، ولتاژ نویزی بین ترمینال‌های V_{cc} و زمین دروازه منطقی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، جریان گذرای عبوری از یک حلقه بزرگ، یک آنتن حلقه‌ای موثری تولید می‌کند.

اندازه ولتاژ گذرای منبع تغذیه با کاهش اندوکتانس‌های L_p و L_g یا با کاهش نرخ تغییر جریان (dI/dt) عبوری از اندوکتانس‌ها کاهش می‌یابد. اندوکتانس را می‌توان با استفاده از صفحات یا شبکه زمین و تغذیه مطابق توضیحات فصل ۱۰ کاهش داد، اما نمی‌توان آن را حذف کرد. سطح حلقه و اندوکتانس، هر دو با تامین جریان گذرا از منبع دیگری مانند خازن یا خازن‌های نزدیک دروازه منطقی مطابق شکل ۱-۱۱ ب کمینه می‌شوند. ولتاژ نویز دو سر دروازه منطقی تابعی از امپدانس خازن C_d

1 - Bus

۲- عملکرد مناسب مدارهای الکترونیکی و تراشه‌ها، هم دیجیتال و هم آنالوگ، به مقدار امپدانس ac کم (در حالت ایده‌آل صفر) بین زمین و تغذیه بستگی دارد. فرض بر این است که هم تغذیه و هم زمین در پتانسیل ac یکسانی هستند.

3 - Logic gate