

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مهندسی سازگاری
الکترومغناطیسی
(جلد ۴)



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

ج. ۳۰-۲-۹۷۴۲۰-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸؛ ج. ۴-۷-۳-۹۷۴۲۰-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸؛

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

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: فیبا

عنوان: مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (جلد ۴)

مترجمان: مصطفی مطاعی، امیرحسام الفتی، محمدحسین کوهی قمصری

ویراستار: امیرحسام الفتی

شابک دوره: ۸-۶۱-۶۶۴۷-۶۶۴۷-۶۲۲-۹۷۸

شابک جلد چهارم: ۷-۳-۹۷۴۲۰-۹۷۴۲۰-۶۲۲-۹۷۸

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 ۴)

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 انسان ها غافل نکند.

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و فداکارمان

دانشجویان، پژوهشگران و صنعتگرانی که خالصانه برای سربلندی و

پیشرفت ایران اسلامی مان تلاش می کنند.

همکاری با صنعت و دانشگاه در

تدوین کتاب و مقاله، مشاوره و آموزش،

طراحی و ساخت سیستم ها بر اساس اصول EMC

۱	مقدمه
۱۵	فصل ۱۶؛ طرح بندی و انباشت بردهای مدار چاپی چندلایه
۱۷	۱-۱۶ ملاحظات عمومی در طرح بندی PCB
۱۷	۱-۱۶ بخش بندی کردن
۱۹	۲-۱۶ حاشیه های ایمنی
۲۰	۳-۱۶ سیگنال های بحرانی
۲۰	۴-۱۶ پالس های ساعت سیستم
۲۱	۲-۱۶ اتصال زمین PCB به شاسی
۲۲	۳-۱۶ قطعی های مسیر برگشت
۲۴	۱-۳-۱۶ شکاف ها در صفحات زمین / تغذیه
۲۶	۲-۳-۱۶ صفحات زمین / تغذیه دوتکه
۲۹	۳-۳-۱۶ تغییر صفحات مرجع
۳۲	۴-۳-۱۶ انتقال بین دو لایه بالا و پایین در یک صفحه مرجع
۳۳	۵-۳-۱۶ کانکتورها
۳۴	۶-۳-۱۶ پرشدگی زمین
۳۵	۴-۱۶ انباشت لایه ها در PCB
۳۶	۱-۴-۱۶ بردهای یک و دو لایه
۳۷	۲-۴-۱۶ بردهای چند لایه
۵۸	۳-۴-۱۶ رویه ی عمومی طراحی PCB

۶۱	..... خلاصه
۶۳	..... مسائل
۶۵	..... مراجع
۶۵	..... منابع مطالعاتی

فصل ۱۷: طرح بندی PCB با سیگنال های ترکیبی ۶۷

۷۰	..... ۱-۱۷ صفحات زمین تکه شده
۷۲	..... ۲-۱۷ توزیع جریان صفحه زمین ریزنوار
۷۶	..... ۳-۱۷ پایه های زمین دیجیتال و آنالوگ
۷۹	..... ۴-۱۷ چه زمانی باید از صفحات زمین دو تکه شده استفاده کرد؟
۸۱	..... ۵-۱۷ تراشه های سیگنال ترکیبی
۸۳	..... ۵-۱۷ سیستم های چند بردی
۸۳	..... ۶-۱۷ مبدل های A/D و D/A با وضوح زیاد
۸۶	..... ۱-۶-۱۷ خط نواری
۸۷	..... ۲-۶-۱۷ خط نواری نامتقارن
۸۸	..... ۳-۶-۱۷ صفحات زمین دیجیتال و آنالوگ جدا شده
۸۹	..... ۷-۱۷ مدارات پشتیبان مبدل های A/D
۸۹	..... ۱-۷-۱۷ پالس های ساعت نمونه برداری
۹۲	..... ۲-۷-۱۷ مدارات پشتیبان سیگنال ترکیبی
۹۴	..... ۸-۱۷ جداسازی عمودی
۹۵	..... ۹-۱۷ توزیع تغذیه سیگنال ترکیبی
۹۵	..... ۱-۹-۱۷ توزیع تغذیه
۹۶	..... ۲-۹-۱۷ پیوند زدایی
۹۸	..... ۱۰-۱۷ مشکل IPC
۱۰۰	..... خلاصه
۱۰۲	..... مسائل
۱۰۴	..... مراجع
۱۰۴	..... منابع مطالعاتی

فصل ۱۸: اندازه گیری های پیش تطابق EMC ۱۰۵

۱۰۸ ۱-۱۸ محیط آزمون
-----	-----------------------

- ۱۰۹..... ۲-۱۸ آنتن‌ها در قیاس با پروب‌ها
- ۱۱۰..... ۳-۱۸ جریان‌های مد مشترک روی کابل‌ها
- ۱۱۳..... ۱-۳-۱۸ رویه‌ی آزمون
- ۱۱۳..... ۲-۳-۱۸ موارد احتیاط
- ۱۱۵..... ۴-۱۸ اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک
- ۱۱۶..... ۱-۴-۱۸ رویه آزمون
- ۱۱۸..... ۲-۴-۱۸ موارد احتیاط
- ۱۱۹..... ۳-۴-۱۸ درزها و روزنه‌های محفظه‌ها
- ۱۱۹..... ۵-۱۸ اندازه‌گیری‌های ولتاژ نویز
- ۱۲۰..... ۱-۵-۱۸ پروب تفاضلی متعادل
- ۱۲۲..... ۲-۵-۱۸ پروب dc تا ۱-GHZ
- ۱۲۳..... ۳-۵-۱۸ موارد احتیاط
- ۱۲۳..... ۶-۱۸ آزمون‌های انتشار هدایتی
- ۱۲۵..... ۱-۶-۱۸ رویه آزمون
- ۱۲۶..... ۲-۶-۱۸ موارد احتیاط
- ۱۲۷..... ۳-۶-۱۸ جدا کردن نویز مد مشترک از مد تفاضلی
- ۱۳۱..... ۷-۱۸ تحلیل‌گرهای طیفی
- ۱۳۲..... ۱-۷-۱۸ توابع آشکارساز
- ۱۳۴..... ۲-۷-۱۸ رویه‌ی آزمون عمومی
- ۱۳۶..... ۸-۱۸ میز سیار EMC
- ۱۳۷..... ۱-۸-۱۸ فهرست قطعات اصلاح کننده
- ۱۳۸..... ۹-۱۸ اندازه‌گیری‌های انتشار تشعشعی در فاصله یک متر
- ۱۳۸..... ۱-۹-۱۸ محیط آزمون
- ۱۳۹..... ۲-۹-۱۸ حدود آزمون اتری
- ۱۴۰..... ۳-۹-۱۸ آنتن‌های آزمون ۱ متری
- ۱۴۳..... ۱۰-۱۸ آزمون ایمنی پیش تطابق
- ۱۴۴..... ۱-۱۰-۱۸ ایمنی تشعشعی
- ۱۴۷..... ۲-۱۰-۱۸ ایمنی هدایتی
- ۱۴۸..... ۳-۱۰-۱۸ ایمنی گذرا
- ۱۵۱..... ۱۱-۱۸ آزمون‌های پیش تطابق کیفیت توان

۱۵۱.....	۱-۱۱-۱۸ هارمونیک ها
۱۵۳.....	۲-۱۱-۱۸ سوسو
۱۵۴.....	۱۲-۱۸ حاشیه
۱۵۴.....	۱-۱۲-۱۸ حاشیه انتشار تشعشعی
۱۵۶.....	۲-۱۲-۱۸ حاشیه تخلیه الکتروستاتیکی
۱۵۷.....	خلاصه
۱۵۹.....	مسائل
۱۶۱.....	مراجع
۱۶۲.....	منابع مطالعاتی
۱۶۳.....	پیوست ها
۱۶۵.....	پیوست الف
۱۷۴.....	پیوست ب
۱۷۷.....	پیوست پ
۱۸۰.....	پیوست ت
۲۰۱.....	پیوست ث
۲۲۶.....	خلاصه
۲۲۷.....	منابع مطالعاتی
۲۲۹.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی

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 وظائف مهم ما بدست آوردن منشاء 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 بین الملل 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 به ویژه ما دانشگاهیان باید اولاً خودمان به این باور برسیم که **“ما می‌توانیم”**، ثانیاً باید این را به همه اقشار جامعه بیاورانیم. 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 دانش پژوهان 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 تحت اللفظی 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 نایبی

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 فارغ التحصیل دانشگاه، مداری ساخته‌اند که در محیط آزمایشگاهی کار می‌کند ولی در محیط صنعتی رفتارهای عجیب و غریب از خود بروز می‌دهد. جای تاسف 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 این که معروف شده که مهندسان EMC در نشر این علم بخیلند و این فوت‌های کوزه‌گری را کمتر آموزش می‌دهند، کتب متعددی در این زمینه در جهان به چاپ رسیده است که بعضاً به عنوان 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 دلدپذیری در پرداختن به هر دو جنبه نظری و عملی این علم به کار بسته است. سال‌ها، قبل از این که این جانب 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. این جانب تمامی مشتاقان الکترونیک را به مطالعه این مجموعه ترغیب می‌نمایم.

مقدمه نویسنده

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 بخوبی 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 تاسف 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. تاکید 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 بصورت 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 بردارد. فصل ۳ شامل زمین‌سازی ایمنی، تغذیه، سیگنال و سخت افزار (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 غیرآرمانی قطعاتی که بر کارکردشان موثر 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 تاثیر 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 تاکید 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 تکمیلی‌تر 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 بخوبی درک نشده است را شرح می‌دهد و پیوست "ه" جواب‌های مسائل انتهای هر فصل را بیان می‌کند.

جا دارد در این جا از همه کسانی که با وقت گذاشتن 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 بخاطر آنها کتاب بهتری شده است.

بخش‌هایی از کتاب در کلاس سازگاری الکترومغناطیسی توسط مارک استفکا در دانشگاه میشیگان - داریون در نیم سال‌های 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 پیشنهاداتی 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 تایید می‌کردیم.

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

اطلاعات فنی بیشتر، اطلاعات به روز شده در مورد مقررات EMC، همین‌طور غلط‌نامه در تارگاہ 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 ۳ 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

EMI: ElectroMagnetic Interference -2

3- RFI: Radio Frequency Interference

برقی (حتی یک اسباب بازی الکترونیکی)، استاندارد EMC نداشته باشد، اجازه فروش نخواهد داشت؛ هر چند 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 الکتریسته ساکن (یکی از مباحث EMC)

سالانه بلیون‌ها دلار به علت خسارت ناشی از تخلیه الکتریسته 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 محصولات مان آزمون‌های کارکردی را با موفقیت گذرانده و بنابراین نیازی به پرداختن به مقوله EMC نداریم! این عقیده را می‌توان با سوالات زیر پاسخ داد:

- آیا ما هم باید شکست‌های پیش آمده 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 نوپز 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 به ویژه مراکز حساس و حیاتی مانند تولیدکنندگان تجهیزات پزشکی، صنایع نظامی، شرکت‌های حمل و نقل، 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. تارگه‌ها آمازون، 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 به عنوان 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: نوپز مدار دیجیتال و طرح‌بندی، فصل ۱۱: تشعشع مدارات دیجیتال، فصل

۱۲: تخلیه الکتریسیته 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 دیباگران تهران به چاپ رسید که مورد استقبال خوبی توسط اساتید دانشگاه‌ها و کارشناسان صنایع واقع شده و هم‌اکنون در حال چاپ مجدد است.

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. همچنین برخی نکات را که جنبه اجرایی و نظارتی دارند را پررنگ کرده‌ایم تا طراحانی که فرصت تحلیل مباحث را ندارند بتوانند سریع‌ترین نکات را بیابند و در طراحی‌هایشان بکار گیرند. 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 به سرعت خریداری و با تعدادی از دانشجویان و 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 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 کتابچه کوچک چاپ کنیم تا علاوه بر کاهش هزینه‌ها، هر شخصی با توجه به موضوع مورد نظر کتابچه مربوطه را تهیه کند. کتابچه‌های ۱ تا ۱۸ متناظر با فصل‌های ۱ تا ۱۸ کتاب بوده و کتابچه‌های ۱۹ و ۲۰ متناظر با پیوست‌های "د" و "و" هستند.

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 (چرا که 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 الکترونیکی 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.motaei.blogfa.com مراجعه فرمایید. در این جا فرصت را غنیمت شمرده و از کلیه دانشجویان و کارشناسانی که مایلند درخصوص EMC، کتاب، مقاله یا پایان‌نامه ارائه کنند **دعوت به همکاری** کنیم. باعث افتخار است که بتوانیم همکاری مفید و موثری داشته باشیم.

تخلیه الکتریسیته ساکن (ESD) – که در این جلد ارائه 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 تاکید می‌شود که مراقب باشید مدارتان به علت یک 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 درخصوص 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 ناییبی 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 آقای مهندس ابراهیم کلانی که در ترجمه فصل‌های ۱۶ و ۱۷ و از آقای مهندس عباس مستخدمین حسینی در ترجمه فصل ۱۸ و از آقای دکتر بنیامین نوروزی که در ترجمه پیوست‌ها همکاری داشتند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آوریم.

مصطفی مطاعی
و همکاران

طرح‌بندی و انباشت بردهای مدار چایی چندلایه

فصل ۱۶

در اغلب محصولات، مدارات الکترونیکی روی یک برد مدار چاپی (PCB) طراحی و طرح‌بندی می‌شوند که در کارکرد محصول و تحقق سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) حیاتی هستند. برد مدار چاپی پیاده‌سازی فیزیکی نقشه‌های شماتیک را ارائه می‌کند.

طراحی و طرح‌بندی درست یک PCB می‌تواند نقش موثری در گذراندن یا شکست محصول در الزامات EMC داشته باشد. مواردی مانند چیدمان قطعات، حاشیه‌های ایمنی، مسیره‌ی خطوط، تعداد لایه‌ها، انباشت^۱ (فاصله و ترتیب) لایه‌ها و ناپیوستگی‌های مسیر بازگشت، در کارکرد EMC یک برد بسیار حیاتی هستند.

۱-۱۶ ملاحظات عمومی در طرح‌بندی PCB

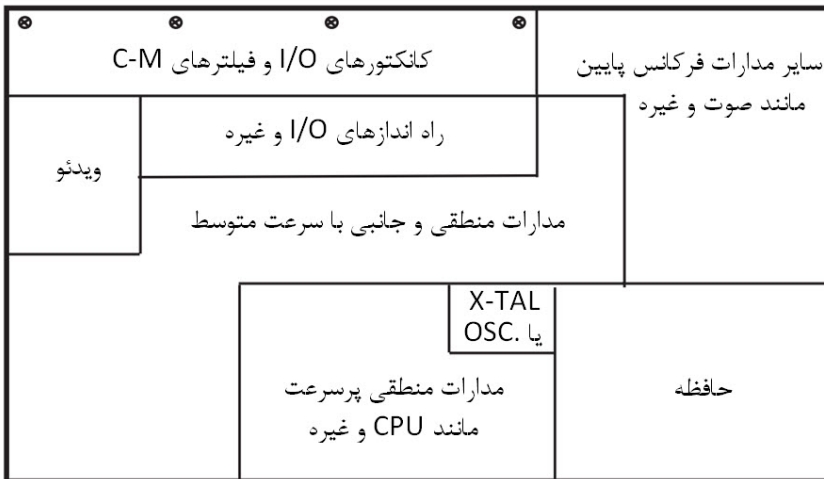
۱-۱۶-۱ بخش‌بندی کردن^۲

چیدمان قطعات در طراحی PCB بسیار مهم است و تاثیر زیادی در طرح‌بندی PCB داشته و در نتیجه تاثیر قابل توجهی در کارکرد EMC برد خواهد داشت؛ ولی غالباً به آن توجه نمی‌شود. قطعات باید به بلوک‌های کارکردی منطقی دسته‌بندی شوند. بعضی از این بلوک‌ها می‌توانند مطابق شکل ۱-۱۶ باشند:

1 - Stackup

2 - Partitioning

- ۱- بلوک مدارات منطقی پرسرعت، پالس‌های ساعت و راه اندازه‌های پالس ساعت.
- ۲- بلوک حافظه
- ۳- بلوک مدارات منطقی با سرعت متوسط و سرعت پایین
- ۴- بلوک تصویر
- ۵- بلوک صوت و سایر مدارات آنالوگ فرکانس پایین
- ۶- راه اندازه‌های I/O
- ۷- کانکتورهای I/O و صافی‌های مد مشترک.



⊗ اتصالات زمین مدار به شاسی

شکل ۱۶-۱ مثالی برای بخش بندی مناسب بردهای مدار چاپی

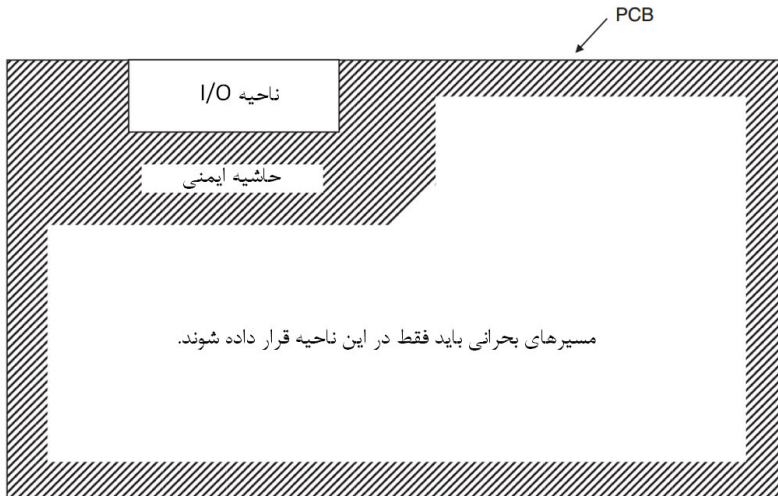
برای بخش‌بندی درست یک برد، قطعات خانواده‌های منطقی سرعت زیاد و حافظه‌ها نباید در محدوده نزدیک به بخش I/O قرار گیرند. کریستال‌ها یا نوسان‌سازهای فرکانس زیاد باید در نزدیکی تراشه‌های مربوطه و دور از ناحیه I/O قرار گیرند. راه اندازه‌های I/O باید در نزدیکی کانکتورها قرار گیرند و بلوک تصویر و مدارات آنالوگ فرکانس پایین باید به ناحیه I/O دسترسی داشته باشند، بدون اینکه از بخش دیجیتال فرکانس زیاد عبور کنند.

بخش‌بندی درست باعث کاهش طول خطوط، بهبود کیفیت سیگنال، کمینه کردن پیوند پراکندگی و کاهش انتشار و تاثیرپذیری PCB می‌شود.

۱۶-۱-۲ حاشیه‌های ایمنی^۱

به ویژه دقت کنید که نوسان‌سازها یا کریستال‌ها و همین‌طور هر مدار فرکانس بالایی را از ناحیه I/O دور نگه دارید. این مدارات، میدان‌های (الکتریکی و مغناطیسی) فرکانس بالایی ایجاد می‌کنند که می‌تواند به راحتی و به‌طور مستقیم با کابل‌های I/O، کانکتورها و مدارات دیگر پیوند ایجاد کنند (شکل ۶-۴۲ را ببینید). تجربه نشان می‌دهد که اگر اندازه برد محدودیتی ایجاد نکند، دور نگه داشتن این مدارات دست کم به اندازه ۰/۵ اینچ (۱۳ mm) از ناحیه I/O، پیوندهای پراکنده را کمینه می‌کند.

تمام خطوط سیگنال‌های بحرانی را (مطابق تعریف بخش ۱۶-۱-۳) دور از لبه‌های برد مسیره‌دهی کنید تا جریان بتواند از زیر خطوط رفت سیگنال مطابق توضیحات بخش ۱۰-۶-۱ بازگردد. یک قانون خوب برای تعریف حاشیه ایمنی، ۲۰ برابر فاصله بین لایه سیگنال تا صفحه برگشتی، دور برد است. هیچ سیگنال بحرانی نباید در این محدوده امن ترسیم شود؛ شکل ۱۶-۲ را ببینید.



شکل ۱۶-۲ یک PCB با حاشیه ایمنی برای سیگنال‌های بحرانی

۱۶-۳ سیگنال‌های بحرانی

تجربه نشان داده است که ۹۰٪ مشکلات مربوط به PCBها از ۱۰٪ مدارات ناشی می‌شود و برای این ۱۰٪ بایستی بیشترین ملاحظات را در طرح‌بندی برد در نظر گرفت. در موضوع انتشار، بزرگترین مسئله، مدارات منطقی فرکانس بالا (زمان صعود سریع) با شکل موج‌های تکرار شونده مانند پالس ساعت‌ها، گذرگاه‌ها و سیگنال‌های کنترلی هستند. این سیگنال‌ها حاوی هارمونیک‌های متعدد فرکانس بالا با دامنه بزرگ هستند. پالس‌های ساعت معمولاً بدترین مهاجم بوده و گذرگاه‌ها و سیگنال‌های کنترلی تکرار شونده به ترتیب مهاجم‌های بعدی هستند. یک معیاری که در مشخص کردن سیگنال‌های بحرانی می‌توان در نظر گرفت، مفهوم «سرعت سیگنال» است^۱. تشعشع یک سیگنال مستقیماً به محتوای طیفی فرکانس بالای جریان آن بستگی دارد و این محتوای طیفی فرکانس بالا یا سرعت سیگنال متناسب است با:

- فرکانس پایه ی F_0 سیگنال
- عکس زمان صعود/نزول t_r
- مقدار جریان راه انداز گذرای I_0 هنگام کلیدزنی دروازه.

بنابراین یک معیار موثر در دسته‌بندی سرعت سیگنال (در واحد A/s^2) به صورت

$$1-16 \quad \text{سرعت سیگنال} \approx (F_0 I_0) / t_r$$

است. سیگنال‌های فرکانس بالای تکرار شونده با جریان‌های بزرگ و زمان‌های صعود/نزول سریع، محتوای طیفی بزرگی دارند. از این رو سرعت سیگنال بایستی برای تمام سیگنال‌های بحرانی، مورد توجه قرار گیرد.

۱۶-۴ پالس‌های ساعت سیستم

به پالس‌های ساعت سیستم بدبین باشید! مسیرهای پالس ساعت را حتی الامکان کوتاه بگیرید و در انجام جایگذاری بهینه، ابتدا آنها را ترسیم کنید. کریستال‌ها، نوسان‌سازها یا تشدیدکننده‌ها را در نزدیکترین موقعیت به مدارات مورد استفاده قرار دهید. در همان طرفی که لایه قطعات نصب می‌شوند، در زیرقطعاتی مانند نوسان‌سازها، کریستال‌ها یا راه‌اندازهای پالس ساعت، یک سطح زمین

1 - Paul, 2006, p. 805