

بسم الله الرحمن الرحيم

**سازگاری الکترومغناطیسی در
سیستم های الکترونیکی و مخابراتی**

(طراحی مدارهای دیجیتال فرکانس بالا)

تألیف

مهندس عباس نعمتی

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه

بهار ۱۳۹۰

سرشناسه : نعمتی، عباس.
عنوان و نام پدیدآور: سازگاری الکترومغناطیسی در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (طراحی مدارهای دیجیتال فرکانس بالا) / تألیف عباس نعمتی.
مشخصات نشر : تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۶.
مشخصات ظاهری: ۴۲، ۴۳۴ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک : 978-964-463-336-2

وضعیت فهرست‌نویسی: فیا.
یادداشت : عنوان اصلی: Abbas Nemati. EMC in Electronics and communicative systems
(Digital Circuits Design of High Frequency)

یادداشت : واژه‌نامه.
یادداشت : کتابنامه.
یادداشت : نمایه.
عنوان دیگر : طراحی مدارهای دیجیتال فرکانس بالا.
موضوع : سازگاری الکترومغناطیسی.
موضوع : مدارهای مجتمع -- طرح و ساختمان.
موضوع : تداخل الکترومغناطیسی.
موضوع : مدارهای چاپی -- طرح و ساختمان.
شنامه افزوده : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
رده‌بندی کنگره : ۲س ۵۷/۲۱/TK۷۸۶۷
رده‌بندی دیویی : ۶۲۱/۳۸۲۲۴
شماره کتابشناسی ملی : ۱۱۲۰۳۰۷

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۸۶/۴/۲۵ شورای چاپ و نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب : سازگاری الکترومغناطیسی در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (طراحی مدارهای دیجیتال فرکانس بالا)
تألیف : مهندس عباس نعمتی
ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ دوم : بهار ۱۳۹۰
تیراژ : ۵۰۰ نسخه
قیمت : ۸۵۰۰ تومان
شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۳۳۶-۲
تلفن مرکز پخش: ۶۶۳۹۸۸۶۸
ISBN: 978-964-463-336-2

آدرس: خیابان ولی‌عصر، رویروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

فهرست شکل ها و جدول ها

پیشگفتار

تاریخچه EMC

مقدمه

فصل اول: اساس سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)

مقدمه	۱
۱-۱) تعریف سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)	۲
۱-۲) تداخل الکترومغناطیسی (EMI)	۲
۱-۲-۱) عناصر مربوط به تداخل الکترومغناطیسی	۴
۱-۲-۲) ماهیت تداخل الکترومغناطیسی	۶
۱-۳) پنج فرض اصلی در تحلیل مدار یا سیستم از لحاظ EMC	۸
۱-۴) مقررات تنظیمی و استانداردها	۱۰
۱-۴-۱) مقررات تنظیمی	۱۰
۱-۴-۱-۱) مقررات تنظیمی کشوری	۱۱
۱-۴-۱-۲) مقررات تنظیمی - جهانی	۱۳
۱-۴-۲) طبقه بندی استانداردها	۱۴
۱-۵) تخلیه الکترواستاتیکی (ESD)	۱۷
۱-۶) سطوح گسیلش پتانسیل RFI/EMI برای مدارها یا سیستم های	
محافظت نشده	۲۱
۱-۷) سرعت انتشار	۲۲
تمرین	۲۴
مراجع	۲۶

مقدمه	۲۷
(۲-۱) گسیلش تشعشعی	۲۸
(۲-۲) حساسیت‌پذیری تشعشعی	۲۹
(۲-۳) اندازه‌گیری گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشعی در مدارهای دیجیتال (به‌طور عملی)	۲۹
(۲-۳-۱) مکان اندازه‌گیری	۳۰
(۲-۳-۲) ابزار اندازه‌گیری	۳۰
(۲-۳-۳) نحوه اندازه‌گیری گسیلش تشعشعی ناشی از یک سیستم یا مدار دیجیتال ...	۳۳
(۲-۳-۴) نحوه اندازه‌گیری حساسیت‌پذیری تشعشعی یک سیستم یا مدار دیجیتال (روش عملی)	۳۴
(۲-۴) اندازه گسیلش/حساسیت‌پذیری تشعشعی در فرکانس‌های مختلف، برای سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A و B از دیدگاه FCC و CISPR22	۳۵
(۲-۵) جریان‌های مد مشترک و تفاضلی	۴۱
(۲-۵-۱) گسیلش‌های تشعشعی ناشی از جریان‌های مد مشترک و تفاضلی	۴۳
(۲-۵-۲) محاسبه گسیلش تشعشعی از طریق مدل‌سازی زوج‌مسیر (سیم) موازی به‌صورت دو آنتن ناخواسته	۴۵
(۲-۵-۲-۱) مدل‌سازی گسیلش تشعشعی برای جریان‌های مد مشترک و تفاضلی	۴۸
مثال (۱-۲)	۵۰
مثال (۲-۲)	۵۴
(۲-۵-۳) فنونی از طراحی و طرح‌بندی برد مدار چاپی برای کاهش تداخل الکترومغناطیسی	۵۷
(۲-۵-۴) اندازه‌گیری عملی جریان‌های مد مشترک توسط کاوشگر جریان در اتصالات ورودی/خروجی	۶۴
(۲-۵-۵) تحلیل گسیلش تشعشعی ناشی از جریان مد مشترک در خط کلاک روی برد مدار چاپی (PCB)	۶۶

۶-۲) مدل‌های ساده شده خطوط انتقال از لحاظ حساسیت‌پذیری تشعشعی	۶۹
۶-۲-۱) محاسبه مقادیر منبع $\hat{V}_S$ و $\hat{I}_S$ القایی ناشی از موج تابشی	۷۱
مثال (۳-۲)	۷۶
مثال (۴-۲)	۷۸
تمرین	۸۱
مراجع	۸۵

فصل سوم: گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی

مقدمه	۸۷
۳-۱) گسیلش هدایتی	۸۷
۳-۲) حساسیت‌پذیری هدایتی	۸۸
۳-۳) اندازه‌گیری گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی در مدارهای دیجیتال (مدارهای مجتمع کلیدزنی فرکانس بالا)	۸۸
۳-۴) اندازه‌گیری گسیلش هدایتی در فرکانس‌های مختلف برای سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A و B از دیدگاه FCC و CISPR22	۹۱
تمرین	۹۶
مراجع	۹۷

فصل چهارم: مشخصات پنهان قطعات غیرفعال در فرکانس‌های بالا

مقدمه	۹۹
۴-۱) مشخصات پنهان قطعات غیرفعال در فرکانس‌های بالا	۹۹
۴-۲) چرایی و چگونگی انتقال انرژی فرکانس بالا در داخل برد مدار چاپی (PCB)، بر اساس مشخصات پنهان قطعات غیرفعال	۱۰۱
۴-۲-۱) شار مغناطیسی و شرایط حذف آن	۱۰۶
تمرین	۱۰۹
مراجع	۱۱۱

فصل پنجم: قطعات لاجیک در مدارهای دیجیتال

مقدمه	۱۱۳
۵-۱) قطعات لاجیک در مدارهای دیجیتال	۱۱۴
۵-۲) مشخصات نويز قطعات لاجیک متداول	۱۱۴
۵-۳) تحلیل طیفی شکل موج مدارهای دیجیتال (سیگنال‌های کلاک و کلیدزنی داخلی مدارهای مجتمع)	۱۱۶
مثال (۵-۱)	۱۱۷
مثال (۵-۲)	۱۱۹
۵-۴) رهنمودهایی در انتخاب قطعات لاجیک	۱۲۲
۵-۵) افزایش ایمنی مدارهای دیجیتال با توجه به قطعات لاجیک (مدارهای مجتمع)	۱۲۶
۵-۵-۱) اندازه حساسیت‌پذیری یا ایمنی قطعات لاجیک نسبت به تداخل الکترومغناطیسی	۱۲۷
۵-۶) راه‌های کاهش اشکالات مربوط به گسیلش تشعشعی از قطعات	۱۲۸
۵-۷) سیگنال کلاک و نحوه ترسیم مرزهای دامنه حوزه فرکانسی آن	۱۳۰
تمرین	۱۴۰
مراجع	۱۴۴

فصل ششم: خطوط انتقال

مقدمه	۱۴۵
۶-۱) خط انتقال و مدار معادل آن	۱۴۵
۶-۲) بازتاب سیگنال در خطوط انتقال	۱۴۸
۶-۲-۱) بررسی اعوجاج سیگنال در مسیر روی برد مدار چاپی	۱۵۱
۶-۳) توپولوژی مسيردهی برای ایجاد یک ساختار خط انتقال	۱۵۴
۶-۴) نحوه تغییر امپدانس مشخصه یک مسیر (خط انتقال) در روی برد مدار چاپی	۱۶۲
۶-۵) اثر بارگذاری خازنی به امپدانس مشخصه خط انتقال و تاخیر انتشار سیگنال	۱۶۴
مثال (۶-۱)	۱۶۵

۶-۶) محاسبه حداکثر طول ممکن مسیر (خط انتقال) روی یک برد مدار چاپی	
(مشخص کردن مسیرهایی با طول الکتریکی بلند)	۱۶۷
۶-۷) محاسبه فاصله بین دو نقطه گسستگی در روی مسیری از یک برد مدار چاپی	
مثال (۶-۲)	۱۷۰
تمرین	۱۷۱
مراجع	۱۷۴

فصل هفتم: تداخل سیگنالی (هم‌شنوایی)

مقدمه	۱۷۵
۷-۱) انواع مکانیسم پیوند	۱۷۵
۷-۲) بررسی تداخل سیگنالی	۱۸۰
۷-۳) فنون طرح‌بندی و طراحی مدارهای دیجیتال برای پیشگیری از تداخل سیگنالی	۱۸۵
۷-۴) قاعده 3-W برای به حداقل رساندن پیوند در بین مسیرهای موازی روی یک برد مدار چاپی	۱۸۸
۷-۵) بررسی مدل‌های مربوط به تداخل سیگنالی سلفی و خازنی در خطوط انتقال یا مسیرهای موازی روی یک برد مدار چاپی	۱۹۰
تمرین	۱۹۹
مراجع	۲۰۲

فصل هشتم: آنتن‌ها و تئوری الکترومغناطیس

مقدمه	۲۰۵
۸-۱) آنتن‌های دوقطبی عنصری	۲۰۷
۸-۱-۱) آنتن دوقطبی الکتریکی	۲۰۷
مثال (۸-۱)	۲۱۲
۸-۱-۲) آنتن دوقطبی مغناطیسی (حلقه جریان)	۲۱۳

مثال (۸-۲).....	۲۱۵
آنتن دوقطبی و تک قطبی.....	۲۱۶
مثال (۸-۳).....	۲۲۰
تمرین.....	۲۲۴
مراجع.....	۲۲۵

فصل نهم: بردهای چند لایه

مقدمه.....	۲۲۷
بردهای ۴ لایه.....	۲۲۷
بردهای ۶ لایه.....	۲۳۰
بردهای ۸ لایه.....	۲۳۳
بردهای ۱۰ لایه.....	۲۳۷
تمرین.....	۲۴۳
مراجع.....	۲۴۴

فصل دهم: کنارگذری و پیوندزدایی

مقدمه.....	۲۴۵
بررسی خازنهای پیوندزدایی.....	۲۴۵
محل قرارگیری خازنهای پیوندزدا در یک برد مدار چاپی.....	۲۴۶
محاسبه مقدار یک خازن پیوندزدا.....	۲۴۹
مثال (۱۰-۱).....	۲۵۰
مثال (۱۰-۲).....	۲۵۰
بررسی خازنهای کنارگذر (کنارگذار).....	۲۵۱
محل قرارگیری و مقدار خازنهای کنارگذر.....	۲۵۱
بررسی خازنهای بدنه.....	۲۵۲
محل قرارگیری خازنهای بدنه.....	۲۵۳

۲۵۴	 محاسبه مقدار یک خازن بدنه
۲۵۶	 مثال (۳-۱۰)
۲۵۷	 تمرین
۲۵۸	 مراجع

فصل یازدهم: فیلتر کردن

۲۵۹	 مقدمه
۲۶۰	 (۱۱-۱) انواع فیلترها
۲۶۵	 (۱۱-۲) طراحی فیلتر برای فیلتر کردن نویزهای روی خط تغذیه نوسان سازها (مولدهای کلاک)
۲۶۸	 (۳-۱۱) فیلتر کردن نویزهای روی خطوط منابع تغذیه [ورودی (طرف اولیه) / خروجی (طرف ثانویه) مبدل ها]
۲۶۸	 (۱۱-۳-۱) ساختار منبع تغذیه و مدل فرکانس بالای آن
۲۷۲	 (۱۱-۳-۲) مدار فیلتر برای کاهش نویز در طرف اولیه مبدل
۲۷۳	 (۱۱-۳-۳) مدار فیلتر برای کاهش نویز در طرف ثانویه مبدل
۲۷۴	 (۱۱-۳-۴) مدل فرکانس بالای منبع تغذیه به همراه فیلترهای اضافه شده به طرف اولیه و ثانویه آن
۲۷۶	 تمرین
۲۷۸	 مراجع

فصل دوازدهم: قسمت بندی

۲۷۹	 مقدمه
۲۸۰	 (۱۲-۱) قسمت بندی برد مدار چاپی به منظور کاهش تداخل الکترومغناطیسی
۲۸۱	 (۱۲-۲) قسمت بندی برد مدار چاپی نسبت به کوچ شعاعی
۲۸۸	 (۱۲-۳) جداسازی کامل قسمت های مختلف از یکدیگر از طریق عایق کاری اطراف آنها

۱۲-۳-۱)	استفاده از مبدل جداسازی به همراه فیلتر خط دیتا و مهره فریتی، به منظور ایجاد اتصالات مشترک در ناحیه عایق کاری شده	۲۹۰
۱۲-۳-۲)	ایجاد پل در ناحیه عایق کاری شده به منظور ایجاد اتصالات مشترک در آن ناحیه	۲۹۱
	تمرین	۲۹۵
	مراجع	۲۹۶

فصل سیزدهم: زمین کردن (طراحی سیستم زمین)

	مقدمه	۲۹۷
۱۳-۱)	خصوصیات سیستم زمین	۲۹۷
۱۳-۲)	انواع روش های زمین کردن (طراحی سیستم زمین)	۳۰۲
۱۳-۲-۱)	زمین کردن تک نقطه ای	۳۰۳
۱۳-۲-۲)	زمین کردن چند نقطه ای	۳۰۶
۱۳-۲-۳)	زمین کردن ترکیبی (انتخابی)	۳۰۷
۱۳-۳)	روش زمین کردن در مدارهای دیجیتال سرعت بالا	۳۱۰
۱۳-۴)	سیستم زمین زنجیره ای	۳۱۰
۱۳-۵)	کنترل پیوند امیدانس مشترک	۳۱۱
۱۳-۶)	حلقه های زمین	۳۱۷
۱۳-۶-۱)	جداسازی دو مدار برای جلوگیری از ایجاد حلقه های زمین	۳۱۸
۱۳-۶-۲)	کاهش ولتاژ نویز و سطح حلقه زمین با استفاده از مسیر برگشت ویژه	۳۲۱
۱۳-۷)	صفحه زمین	۳۲۳
	تمرین	۳۲۵
	مراجع	۳۲۷

۳۲۹	 مقدمه
۳۳۰	 (۱۴-۱) هدف از حفاظ گذاری
۳۳۲	 (۱۴-۲) تأثیر حفاظ گذاری (SE)
۳۴۳	 (۱۴-۲-۱) تأثیر حفاظ گذاری در صورت وجود شکاف های مختلف در حفاظ
۳۴۹	 (۱۴-۳) انواع خطوط اتصال در حفاظ ها (ورقه های حفاظ)
۳۵۰	 (۱۴-۴) زمین کردن جعبه محافظ (اتصال حفاظ به زمین)
۳۵۳	 (۱۴-۵) حفاظ گذاری سیم ها (کابل ها) و اتصال حفاظ آنها به زمین
۳۵۶	 (۱۴-۶) حفاظ گذاری مبدل مربوط به تغذیه مدار یا سیستم
۳۵۷	 (۱۴-۷) محفظه های ساخته شده از حفاظ
۳۵۸	 (۱۴-۷-۱) انواع محفظه های ساخته شده از حفاظ
۳۶۰	 کج تمرین
۳۶۲	 مراجع

۳۶۳	 مقدمه
۳۶۶	 (۱۵-۱) مواقع ضرورت استفاده از پایان دهی مسیر در صورت عدم وجود تطبیق امپدانس
۳۶۷	 مثال (۱-۱۵)
۳۶۹	 مثال (۲-۱۵)
۳۷۱	 (۱۵-۲) روش های پایان دهی مسیر
۳۷۱	 (۱۵-۲-۱) بررسی پایان دهی سری
۳۷۴	 (۱۵-۲-۱-۱) مزایای پایان دهی سری
۳۷۴	 (۱۵-۲-۱-۲) معایب پایان دهی سری
۳۷۵	 (۱۵-۲-۲) بررسی پایان دهی موازی
۳۷۵	 (۱۵-۲-۲-۱) مزایای پایان دهی موازی

۳۷۶	 (۱۵-۲-۲-۲) معایب پایان‌دهی موازی
۳۷۶	 (۱۵-۲-۳) بررسی پایان‌دهی تونن
۳۷۷	 (۱۵-۲-۳-۱) مزایای پایان‌دهی تونن
۳۷۸	 (۱۵-۲-۳-۲) معایب پایان‌دهی تونن
۳۷۹	 (۱۵-۲-۴) بررسی پایان‌دهی RC
۳۸۰	 (۱۵-۲-۴-۱) مزایای پایان‌دهی RC
۳۸۱	 (۱۵-۲-۴-۲) معایب پایان‌دهی RC
۳۸۱	 (۱۵-۲-۵) بررسی پایان‌دهی دیودی
۳۸۱	 (۱۵-۲-۵-۱) مزایای پایان‌دهی دیودی
۳۸۲	 (۱۵-۲-۵-۲) معایب پایان‌دهی دیودی
۳۸۳	 (۱۵-۳) خط انتقال یا مسیر دوشاخه‌شده و پایان‌دهی آن
۳۸۴	 (۱۵-۴) پایان‌دهی خطوط یا مسیرهای سیگنال کلاک
۳۸۷	 تمرین
۳۸۹	 مراجع

ضمایم

۳۹۱	 ضمیمهٔ ۱: نفوذپذیری نسبی (ϵ_r)
۳۹۲	 ضمیمهٔ ۲: قابلیت گذردهی نسبی (μ_r) و ضریب هدایت (σ)
۳۹۲	 ضمیمهٔ ۳: خواص فضای آزاد
۳۹۳	 ضمیمهٔ ۴: ثابت‌های فیزیکی
۳۹۳	 ضمیمهٔ ۵: خواص نوعی هادی‌ها
۳۹۴	 ضمیمهٔ ۶: خواص نوعی عایق‌ها
۳۹۵	 ضمیمهٔ ۷: انواع باندهای فرکانسی، طول موج متناظر و موارد کاربرد آنها
۳۹۶	 ضمیمهٔ ۸: طول موج در فضای آزاد برای فرکانس‌های مختلف
۳۹۶	 ضمیمهٔ ۹: تبدیل دسی‌بل‌ها
۳۹۷	 ضمیمهٔ ۱۰: اندازهٔ سیم‌های مختلف و قطر آنها

ضمیمه ۱۱: مقاومت تشعشعی و راکتانس آنتن دوقطبی به صورت تابعی از طول و شعاع سیم	۳۹۸
ضمیمه ۱۲: عمق پوستی برای مس در فرکانس های مختلف	۳۹۸
ضمیمه ۱۳: نمودار امپدانس صفحه های زمین مسی در فرکانس های مختلف	۳۹۹
ضمیمه ۱۴: نمودار امپدانس سیم های مسی به طول ۱ متر در فرکانس های مختلف	۳۹۹
ضمیمه ۱۵: نمودار امپدانس نواحی روی برد مدار چاپی با ضخامت ۳۶ میکرومتر و طول ۱ متر در فرکانس های مختلف	۴۰۰
ضمیمه ۱۶: امپدانس تیوب استوانه ای ضخیم به طول ۱ متر در فرکانس های مختلف	۴۰۰
ضمیمه ۱۷: فرکانس های مربوط به کانال های تلویزیونی	۴۰۱
ضمیمه ۱۸: اندازه گیری گسیلش تشعشعی یک سیستم، توسط تحلیلگر طیف در یک اتاق حفاظ گذاری شده	۴۰۳
ضمیمه ۱۹: نمونه ای از کاوشگر جریان RF	۴۰۳
ضمیمه ۲۰: مشخصات خطوط انتقال در فرکانس رادیویی (RF)	۴۰۴
ضمیمه ۲۱: تبدیل واحدهای مختلف طول به سانتی متر	۴۰۴
واژه نامه انگلیسی - فارسی	۴۰۵
واژه نامه فارسی - انگلیسی	۴۱۵
فهرست راهنما	۴۲۵

شکل ۱-۱: توضیح تداخل.....	۳
شکل ۲-۱: مدل بدن انسان برای تحلیل ESD.....	۱۸
شکل ۳-۱: توضیح پیوند ESD به یک مدار الکترونیکی.....	۲۰
شکل ۱-۲: گسیلش تشعشعی.....	۲۸
شکل ۲-۲: حساسیت‌پذیری تشعشعی.....	۲۹
شکل ۳-۲: اصول کار دستگاه تحلیلگر طیف.....	۳۱
شکل ۴-۲: آشکارساز پیک.....	۳۲
شکل ۵-۲: آشکارساز نیم‌پیک برای لبه‌های نوک‌تیز با فاصله دور از یکدیگر.....	۳۲
شکل ۶-۲: آشکارساز نیم‌پیک برای لبه‌های نوک‌تیز با فاصله نزدیک به یکدیگر.....	۳۳
شکل ۷-۲: اندازه‌گیری گسیلش تشعشعی یک سیستم یا مدار دیجیتال.....	۳۴
شکل ۸-۲: اندازه گسیلش تشعشعی در مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه FCC.....	۳۶
شکل ۹-۲: اندازه گسیلش تشعشعی در مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه FCC.....	۳۷
شکل ۱۰-۲: مقایسه اندازه گسیلش تشعشعی سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A و B از دیدگاه FCC در فاصله اندازه‌گیری ۳ متر.....	۳۸
شکل ۱۱-۲: مقایسه اندازه گسیلش تشعشعی سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه FCC و CISPR22.....	۴۰
شکل ۱۲-۲: مقایسه اندازه گسیلش تشعشعی سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه FCC و CISPR22.....	۴۱
شکل ۱۳-۲: جریان‌های مد مشترک و تفاضلی.....	۴۱
شکل ۱۴-۲: گسیلش‌های تشعشعی ناشی از جریان‌های مد مشترک.....	۴۴
شکل ۱۵-۲: گسیلش‌های تشعشعی ناشی از جریان‌های مد تفاضلی.....	۴۴
شکل ۱۶-۲: محاسبه گسیلش تشعشعی در زوج‌مسیر موازی.....	۴۶

- شکل ۲-۱۷: سیگنال کلاک و طیف یک طرفه دامنه جریان یکطرفه ۵۲
- شکل ۲-۱۸: توضیح سطح حلقه و گسیلش تشعشی ۵۳
- شکل ۲-۱۹: حداکثر گسیلش تشعشی مد مشترک ۵۳
- شکل ۲-۲۰: اثر افزایش زمان صعود سیگنال کلاک در کاهش $|E_{Cmax}|$ ۵۶
- شکل ۲-۲۱: فاصله بین خط سیگنال (مسیر رفت) و برگشت جریان RF ۵۸
- شکل ۲-۲۲: توضیح چوک مد مشترک ۵۹
- شکل ۲-۲۳: مسائل مربوط به چوک ۶۰
- شکل ۲-۲۴: پاسخ فرکانسی رفتار μ_r برای فریت‌های منگنز-روی و نیکل-روی ۶۱
- شکل ۲-۲۵: ساختار یک مهره فریتی و مدار معادل آن ۶۲
- شکل ۲-۲۶: ساختار یک مهره فریتی با چند دور سیم ۶۲
- شکل ۲-۲۷: توضیح قانون آمپر ۶۵
- شکل ۲-۲۸: کاربرد کاوشگر برای اندازه‌گیری جریان ۶۵
- شکل ۲-۲۹: تراکم طیفی گسیلش تشعشی ناشی از جریان مد مشترک کلاک، متغیر از f_0 تا $10f_0$ ۶۷
- شکل ۲-۳۰: گسیلش تشعشی ناشی از جریان مد مشترک کلاک، تابعی از فاصله خط کلاک تا خطوط مجاور (K) (در فرکانس کلاک ۵۰۰ مگاهرتز) ۶۸
- شکل ۲-۳۱: مدل‌سازی یک خط انتقال دو سیمه برای تعیین ولتاژهای پیونیده به پایانه‌ها ۷۰
- شکل ۲-۳۲: مدل ساده‌شده خط انتقال با در نظر گرفتن منابع القایی ۷۵
- شکل ۲-۳۳: اثر منبع ولتاژ القایی به ولتاژهای القایی در پایانه‌ها ۷۵
- شکل ۲-۳۴: اثر منبع جریان القایی به ولتاژهای القایی در پایانه‌ها ۷۵
- شکل ۲-۳۵: محاسبه ولتاژهای القایی به پایانه‌های خط انتقال ۷۷
- شکل ۲-۳۶: محاسبه ولتاژهای القایی به پایانه‌های خط انتقال ۷۹
- شکل ۳-۱: گسیلش هدایتی ۸۸
- شکل ۳-۲: حساسیت‌پذیری هدایتی ۸۸
- شکل ۳-۳: اندازه‌گیری گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی ۸۹
- شکل ۳-۴: اندازه گسیلش هدایتی در مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه FCC ۹۲

- شکل ۳-۵: اندازه گسیلش هدایتی در مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه FCC..... ۹۲
- شکل ۳-۶: مقایسه محدوده‌های گسیلش هدایتی از دیدگاه FCC و CISPR22..... ۹۴
- شکل ۳-۷: مقایسه محدوده‌های گسیلش هدایتی از دیدگاه FCC و CISPR22..... ۹۵
- شکل ۴-۱: مشخصات قطعات غیرفعال در فرکانس‌های بالا (فرکانس‌های رادیویی)..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲: وضعیت مدار حلقه بسته..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳: مدار حلقه بسته با مسیر برگشت نامناسب..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱: شکل موج مثلی..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲: شکل موج دوزنقه‌ای..... ۱۱۸
- شکل ۵-۳: خطای شمارنده..... ۱۲۱
- شکل ۵-۴: خطای ثبات تغییر مکان..... ۱۲۱
- شکل ۵-۵: خطای ایجادشده به خاطر وجود بازتاب در روی سیم‌های طولانی..... ۱۲۲
- شکل ۵-۶: ساختار TTL و HS-CMOS..... ۱۲۵
- شکل ۵-۷: سیگنال کلاک (پالس دوزنقه‌ای)..... ۱۳۰
- شکل ۵-۸: مشتق مرتبه اول و دوم سیگنال کلاک (پالس دوزنقه‌ای)..... ۱۳۲
- شکل ۵-۹: حوزه فرکانسی یک شکل موج مربعی..... ۱۳۷
- شکل ۵-۱۰: مرزهای روی تابع $|\frac{\sin x}{x}|$ ۱۳۸
- شکل ۵-۱۱: مرزهای روی دامنه حوزه فرکانسی یک طرفه سیگنال کلاک (موج دوزنقه‌ای)..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱: خطوط انتقال..... ۱۴۶
- شکل ۶-۲: سیستم خط انتقال نوعی برای بررسی بازتاب..... ۱۴۸
- شکل ۶-۳: بازتاب‌ها در یک خط انتقال..... ۱۴۹
- شکل ۶-۴: حلقوی شدن لبه‌های سیگنال..... ۱۵۲
- شکل ۶-۵: گردش لبه‌های سیگنال..... ۱۵۳
- شکل ۶-۶: مدار معادل برای بررسی حلقوی شدن و گردش لبه‌های سیگنال..... ۱۵۳
- شکل ۶-۷: ساختار توپولوژی تک‌ریزنوار..... ۱۵۵

- شکل ۶-۸: ساختار توپولوژی ریزنوار جای داده شده ۱۵۷
- شکل ۶-۹: ساختار توپولوژی تک خط نواری ۱۵۸
- شکل ۶-۱۰: ساختار توپولوژی خط نواری دو گانه ۱۶۰
- شکل ۶-۱۱: ساختار توپولوژی تفاضلی ۱۶۱
- شکل ۶-۱۲: نقاط گسستگی و فاصله بین آنها در یک مسیر روی برد مدار چاپی ۱۷۰
- شکل ۷-۱: پیوند [میدان] مغناطیسی در بین دو مدار یا دو مسیر متفاوت ۱۷۶
- شکل ۷-۲: پیوند الکتریکی در بین دو مدار یا دو مسیر متفاوت ۱۷۷
- شکل ۷-۳: پیوند مغناطیسی (سلفی) و الکتریکی (خازنی) در بین مسیرها ۱۷۸
- شکل ۷-۴: پیوند امیدانس مشترک ۱۸۰
- شکل ۷-۵: ساختاری با سه مسیر برای بیان تداخل سیگنالی ۱۸۱
- شکل ۷-۶: تداخل سیگنالی در مسیرهای موازی روی صفحه زمین ۱۸۲
- شکل ۷-۷: نمونه ای از پیوند سلفی و خازنی در مسیرهای موازی روی یک برد مدار چاپی ۱۸۳
- شکل ۷-۸: ساختار تداخل سیگنالی با وضعیت قرارگیری مختلف مسیرها نسبت به یکدیگر و صفحه زمین ۱۸۶
- شکل ۷-۹: توزیع تراکم جریان از مسیر سیگنال به صفحه زمین ۱۸۷
- شکل ۷-۱۰: طراحی مسیرهای موازی روی یک برد مدار چاپی بر اساس قاعده 3-W ۱۸۹
- شکل ۷-۱۱: طراحی مسیرهای موازی روی یک صفحه زمین بر اساس قاعده 3-W ۱۸۹
- شکل ۷-۱۲: طراحی مسیرهای زوج تفاضلی روی صفحه زمین بر اساس قاعده 3-W ۱۹۰
- شکل ۷-۱۳: مدل تداخل سیگنالی در خطوط انتقال امیدانس توزیعی ۱۹۱
- شکل ۷-۱۴: مدل های مربوط به تداخل سیگنالی ۱۹۲
- شکل ۷-۱۵: دو سیم در روی صفحه زمین ۱۹۷
- شکل ۷-۱۶: ولتاژهای پسرو و پیشرو پیونیده به مدار حساس به نویز (خطوط با طول الکتریکی بلند) ۱۹۸
- شکل ۷-۱۷: ولتاژهای پسرو و پیشرو پیونیده به مدار حساس به نویز (خطوط با طول الکتریکی کوتاه) ۱۹۸

- شکل ۸-۱: مدل آنتن دو قطبی الکتریکی ۲۰۸
- شکل ۸-۲: مدل آنتن دوقطبی مغناطیسی (حلقه جریان) ۲۱۳
- شکل ۸-۳: آنتن دوقطبی ۲۱۷
- شکل ۸-۴: آنتن تک قطبی ۲۱۷
- شکل ۸-۵: محاسبه میدان‌های تشعشعی آنتن دوقطبی در نقطه A ۲۱۸
-
- شکل ۹-۱: ساختار برد ۴ لایه و وجود فاصله متقارن در بین لایه‌ها ۲۲۸
- شکل ۹-۲: ساختار برد ۴ لایه و وجود فاصله نامتقارن در بین لایه‌ها ۲۲۹
- شکل ۹-۳: ساختار برد ۴ لایه - ساختار متناوب ۲۲۹
- شکل ۹-۴: ساختار برد ۶ لایه با ۴ لایه مسیردهی و ۲ صفحه مرجع ۲۳۰
- شکل ۹-۵: ساختار برد ۶ لایه با ۴ لایه مسیردهی و ۲ صفحه مرجع (ساختار دوم) ۲۳۲
- شکل ۹-۶: ساختار برد ۸ لایه با ۶ لایه مسیردهی و ۲ صفحه مرجع ۲۳۴
- شکل ۹-۷: ساختار برد ۸ لایه با ۴ لایه مسیردهی و ۴ صفحه مرجع ۲۳۶
- شکل ۹-۸: ساختار برد ۱۰ لایه با ۶ لایه مسیردهی و ۴ صفحه مرجع ۲۳۸
- شکل ۹-۹: ساختار برد ۱۰ لایه با ۶ لایه مسیردهی و ۴ صفحه مرجع (ساختار دوم) ۲۴۰
-
- شکل ۱۰-۱: مدار معادل یک برد مدار چاپی ۲۴۶
- شکل ۱۰-۲: مدل توزیع توان برای کنترل حلقه ۲۴۸
- شکل ۱۰-۳: مدار معادل تونن برای یک مدار ۲۴۹
- شکل ۱۰-۴: محل قرارگیری و مقادیر خازن‌های کنارگذر در مدارهای دیجیتال ۲۵۱
-
- شکل ۱۱-۱: فیلترهای پایین‌گذر ۲۶۱
- شکل ۱۱-۲: فیلترهای بالاگذر ۲۶۱
- شکل ۱۱-۳: فیلترهای میان‌گذر ۲۶۲
- شکل ۱۱-۴: فیلترهای میان‌نگذر ۲۶۳
- شکل ۱۱-۵: مهره‌های فریتی ۲۶۳
- شکل ۱۱-۶: فیلتر RC برای حذف سیگنال‌های نوک‌تیز ۲۶۴

- شکل ۱۱-۷: فیلتر کردن نویزهای روی خط تغذیه نوسان‌سازها ۲۶۶
- شکل ۱۱-۸: ساختار یک منبع تغذیه خطی ۲۶۹
- شکل ۱۱-۹: مدل فرکانس بالای منبع تغذیه خطی ۲۶۹
- شکل ۱۱-۱۰: عناصر مورد استفاده به همراه یکسوسازها به منظور کاهش تغییرات ناگهانی و یا اندازه سیگنال‌های نوک‌تیز در زمان روشن/خاموش شدن آنها ۲۷۱
- شکل ۱۱-۱۱: مدار فیلتر برای کاهش نویز در طرف اولیه مبدل ۲۷۲
- شکل ۱۱-۱۲: مدار فیلتر طراحی شده برای کاهش نویز در طرف اولیه مبدل (ساختار دوم) ۲۷۳
- شکل ۱۱-۱۳: مدار فیلتر برای کاهش نویز در طرف ثانویه مبدل ۲۷۴
- شکل ۱۱-۱۴: مدل فرکانس بالای منبع تغذیه به همراه فیلترهای اضافه‌شده به طرف اولیه و ثانویه آن ۲۷۵
- شکل ۱۲-۱: مفهوم کوچ شعاعی و نمونه‌ای از قسمت‌بندی مدار نسبت به آن ۲۸۲
- شکل ۱۲-۲: ساختار کلی قسمت‌بندی برد مدار چاپی نسبت به کوچ شعاعی ۲۸۲
- شکل ۱۲-۳: قسمت‌بندی مدارهای دیجیتال نسبت به کوچ شعاعی ۲۸۳
- شکل ۱۲-۴: قسمت‌بندی یک برد مادر (مادر برد) ۲۸۵
- شکل ۱۲-۵: قسمت‌بندی یک برد مدار چاپی به صورت شعاعی ۲۸۶
- شکل ۱۲-۶: طراحی و قسمت‌بندی یک مدار میکروپروسسوری (دارای ریزپردازنده) ۲۸۷
- شکل ۱۲-۷: طرح‌بندی مناسب یک برد مدار چاپی برای یک سیستم دیجیتال ۲۸۸
- شکل ۱۲-۸: جداسازی کامل قسمت‌های مختلف از یکدیگر از طریق عایق‌کاری ۲۸۹
- شکل ۱۲-۹: استفاده از مبدل جداسازی به همراه فیلتر خط دیتا و مهره فریتی ۲۹۰
- شکل ۱۲-۱۰: ایجاد پل در ناحیه عایق‌کاری شده ۲۹۲
- شکل ۱۲-۱۱: نقض مفهوم ناحیه عایق‌کاری شده و پل، به همراه ارائه یک روش صحیح برای استفاده بهینه از آنها ۲۹۲
- شکل ۱۳-۱: نمادهای زمین استاندارد ۲۹۹
- شکل ۱۳-۲: وصل شاسی سیستم به سیم سبز در نقطه ورودی برق شهر ۳۰۰
- شکل ۱۳-۳: عدم وجود مرجع زمین (زمین سیگنال) مناسب در بین منبع و بار ۳۰۲
- شکل ۱۳-۴: ساختار زمین کردن تک‌نقطه‌ای سری ۳۰۳

- شکل ۱۳-۵: ساختار زمین کردن تک نقطه‌ای موازی ۳۰۴
- شکل ۱۳-۶: سیستم - زمین تک نقطه‌ای موازی ۳۰۵
- شکل ۱۳-۷: سیستم - زمین تک نقطه‌ای اصلاح شده ۳۰۵
- شکل ۱۳-۸: ساختار زمین کردن چند نقطه‌ای ۳۰۶
- شکل ۱۳-۹: سیستم - زمین چند نقطه‌ای (اتصال به زمین شاسی) ۳۰۷
- شکل ۱۳-۱۰: ساختار زمین کردن ترکیبی ۳۰۸
- شکل ۱۳-۱۱: ساختار نوعی سیستم - زمین ترکیبی ۳۰۹
- شکل ۱۳-۱۲: ساختار سیستم - زمین زنجیره‌ای ۳۱۱
- شکل ۱۳-۱۳: اثر پوستی (جاری جریان در یک رسانا) ۳۱۲
- شکل ۱۳-۱۴: تفکیک مسیرهای زمین (و تغذیه) از یکدیگر برای جلوگیری از پیوند امپدانس مشترک ۳۱۴
- شکل ۱۳-۱۵: پیوند امپدانس مشترک در مسیر زمین و تغذیه ۳۱۵
- شکل ۱۳-۱۶: ایجاد حلقه‌های زمین در مدار یا سیستم ۳۱۸
- شکل ۱۳-۱۷: جداسازی دو مدار توسط یک مبدل ۳۱۹
- شکل ۱۳-۱۸: جداسازی دو مدار توسط چوک مد مشترک ۳۲۰
- شکل ۱۳-۱۹: جداسازی دو مدار توسط جداساز نوری ۳۲۱
- شکل ۱۳-۲۰: استفاده از زوج سیم به یکدیگر پیچیده شده برای کاهش ولتاژ نویز و سطح حلقه‌های زمین در یک مدار دیجیتال فرکانس بالا ۳۲۲
- شکل ۱۳-۲۱: ساختار یک صفحه زمین ۳۲۴
- شکل ۱۴-۱: هدف از حفاظ‌گذاری ۳۳۰
- شکل ۱۴-۲: حفاظ و موج (میدان) تابشی، عبوری و بازتابی از آن ۳۳۳
- شکل ۱۴-۳: موج تابشی، عبوری، بازتابی و بازتاب‌های متعدد در حفاظ ۳۳۳
- شکل ۱۴-۴: اندازه امپدانس موج ۳۳۷
- شکل ۱۴-۵: موج الکترومغناطیسی تابشی، مغناطیسی نفوذی و الکتریکی بازتابی به حفاظ .. ۳۴۰
- شکل ۱۴-۶: یک شکاف مستطیلی در یک حفاظ ۳۴۳
- شکل ۱۴-۷: یک شکاف دایروی در یک حفاظ ۳۴۴

- شکل ۱۴-۸: آرایه شکاف‌های مستطیلی در یک حفاظ ۳۴۵
- شکل ۱۴-۹: یک شبکه سیمی ۳۴۶
- شکل ۱۴-۱۰: آرایه شکاف‌های دایروی در حفاظ ۳۴۷
- شکل ۱۴-۱۱: خطوط اتصالات دائمی در حفاظ‌ها ۳۴۹
- شکل ۱۴-۱۲: خطوط اتصالات موقت در حفاظ‌ها ۳۵۰
- شکل ۱۴-۱۳: محل اتصال جعبه محافظ به زمین در نزدیکی نقاط ورودی/خروجی سیگنال ۳۵۰
- شکل ۱۴-۱۴: اتصال جعبه محافظ به زمین برای جلوگیری از ایجاد پسخورد ناخواسته ۳۵۱
- شکل ۱۴-۱۵: نحوه اتصال جعبه‌های محافظ و ایمنی به زمین ۳۵۲
- شکل ۱۴-۱۶: حفاظ‌گذاری سیم‌ها و اتصال حفاظ آنها به زمین ۳۵۳
- شکل ۱۴-۱۷: حفاظ‌گذاری سیم‌ها و اتصال حفاظ آنها به زمین ۳۵۵
- شکل ۱۴-۱۸: نحوه خارج نمودن خطوط سیگنال از جعبه محافظ ۳۵۶
- شکل ۱۴-۱۹: حفاظ‌گذاری مبدل تغذیه ۳۵۷
-
- شکل ۱۵-۱: ساختار مدار مربوط به پایان‌دهی سری ۳۷۲
- شکل ۱۵-۲: توزیع تغذیه برای بارهای متعدد در نقطه انتهایی از یک منبع مشترک ۳۷۴
- شکل ۱۵-۳: ساختار مدار مربوط به پایان‌دهی موازی ۳۷۵
- شکل ۱۵-۴: ساختار مدار مربوط به پایان‌دهی تونن ۳۷۷
- شکل ۱۵-۵: ساختار مدار مربوط به پایان‌دهی RC ۳۷۹
- شکل ۱۵-۶: استفاده از پایان‌دهی RC برای مسیرهای زوج تفاضلی ۳۸۰
- شکل ۱۵-۷: ساختار مدار مربوط به پایان‌دهی دیودی ۳۸۱
- شکل ۱۵-۸: خط انتقال دوشاخه شده و پایان‌دهی آن ۳۸۳
- شکل ۱۵-۹: مسیرهای سیگنال کلاک و پایان‌دهی آنها ۳۸۵

جدول ۱-۲: ثابت دی الکتریک و سرعت انتشار موج در مواد مختلف.....	۲۳
جدول ۲-۱: اندازه گسیلش تشعشعی در سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه FCC.....	۳۶
جدول ۲-۴: اندازه گسیلش تشعشعی سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه CISPR22 (فاصله اندازه گیری ۱۰ متر است).....	۳۹
جدول ۳-۱: اندازه گسیلش هدایتی در سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه FCC.....	۹۱
جدول ۳-۲: اندازه گسیلش هدایتی در سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه FCC.....	۹۲
جدول ۳-۳: اندازه گسیلش هدایتی در سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس A از دیدگاه CISPR22.....	۹۳
جدول ۳-۴: اندازه گسیلش هدایتی در سیستم‌ها یا مدارهای دیجیتال کلاس B از دیدگاه CISPR22.....	۹۳
جدول ۵-۱: مشخصات نویز قطعات لاجیک متداول.....	۱۱۵
جدول ۵-۲: پارامترهای مهم مربوط به قطعات لاجیک.....	۱۲۳
جدول ۶-۱: امپدانس مشخصه مسیرهای روی برد مدار چاپی در حالات مختلف.....	۱۶۳
جدول ۶-۲: I_{max} برای انواع مختلف قطعات لاجیک، در توپولوژی تک ریزنوار و تک خط نواری.....	۱۶۸
جدول ۹-۱: راهنمای تخصیص لایه‌ها برای بردهای چندلایه.....	۲۴۱
جدول ۱۳-۱: راهنمای انتخاب نوع سیستم- زمین برحسب فرکانس کار مدار.....	۳۰۹
جدول ۱۴-۳: تأثیر حفاظ گذاری در برابر میدان‌های الکتریکی با اندازه امپدانس ۴ کیلو اهم،.....	۳۳۹
جدول ۱۴-۴: تأثیر حفاظ گذاری در برابر امواج صفحه‌ای با اندازه امپدانس ۳۷۷ اهم،.....	۳۳۹
جدول ۱۴-۵: تأثیر حفاظ گذاری در برابر میدان‌های مغناطیسی با اندازه امپدانس ۴۰ اهم، ...	۳۴۰
جدول ۱۵-۱: نتایج کلی و وضعیت تطبیق امپدانس خط انتقال با منبع و بار.....	۳۶۴
جدول ۱۵-۲: انواع روش‌های پایان دهی و ویژگی مهم آنها.....	۳۸۲

پیشگفتار

کتاب حاضر، حاصل چندین سال تلاش، تحقیق و مطالعه بسیار زیاد و مستمر اینجانب بوده و هدف از نگارش آن، در اختیار قرار دادن یک مرجع فارسی بسیار مناسب در زمینه مباحث مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) می باشد که بنا به دلایل متعدد از جمله مهم و اساسی بودن بحث سازگاری الکترومغناطیسی در طراحی مدارها یا سیستم های الکترونیکی و مخابراتی (به منظور افزایش کیفیت و کارکرد آنها در محیط های مختلف الکترومغناطیسی)، نبود مراجع مناسب و جامع قابل دسترس (تنها به یک کتاب انگلیسی محدود می شد که مرجع اصلی کتاب درسی دانشگاهی بود)، عدم آگاهی مطلوب جامعه مهندسين برق از مباحث کلی EMC و...، اینجانب را بر آن داشت که به عنوان عضوی کوچک از جامعه مهندسين برق، به تحقیق و به رشته تحریر در آوردن این اثر همت گمارم.

این کتاب می تواند برای دانشجویان، مهندسين و طراحان در مراکز مختلف از جمله آزمایشگاه ها، مراکز علمی، آموزشی، تحقیقاتی و صنایع مرتبط با الکترونیک و مخابرات به منظور انجام تحقیقات، طراحی و ساخت مدارها یا سیستم های الکترونیکی و مخابراتی (بویژه دیجیتال فرکانس بالا)، بسیار ارزشمند باشد.

با توجه به دروس دانشگاهی، درس EMC تحت عنوان «مباحث ویژه» در دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق با گرایش الکترونیک و مخابرات تدریس می‌شود؛ لذا این کتاب در دانشگاه‌ها برای دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد بسیار سودمند بوده و به عنوان یک درس اختیاری (۳ واحدی) یا کمک درسی برای دانشجویان سال آخر این رشته‌ها در مقطع کارشناسی پیشنهاد می‌گردد.

در پایان لازم به ذکر است که هر اثری ممکن است دارای کاستی‌هایی باشد؛ لذا از تمامی اساتید، مهندسين، دانشجویان، صاحب‌نظران و علاقه‌مندان به این مباحث، خواهشمند است با ارائه پیشنهادها و دیدگاه‌های سازنده خود به منظور رفع کاستی‌ها و افزایش کیفی و محتوایی کتاب در چاپ‌های بعدی، اینجانب را مورد لطف و عنایت خویش قرار دهند.

کتاب *سازگاری الکترومغناطیسی در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی*، اولین منبع فارسی در ایران می‌باشد که در زمینه مباحث مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) - حاوی اصول، استانداردها، روش‌ها و فنون مختلف EMC برای طراحی مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (بوژه دیجیتال فرکانس بالا) - نوشته شده است. امید است که ارائه این کتاب بتواند ما را در جهت پیشبرد علم الکترونیک و مخابرات، و ترویج مباحث مربوط به EMC یاری‌داده و کاستی‌های موجود در این زمینه را تقلیل بخشد.

با آرزوی توفیق الهی

مهندس عباس نعمتی

کارشناس ارشد برق و الکترونیک

اردیبهشت ۱۳۸۵

تاریخچه سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)

نحوه شکل‌گیری پدیده‌های مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) و به‌وجود آمدن این موضوع، از زمانی آغاز شد که اولین تداخل الکترومغناطیسی (EMI) توسط شخصی به نام «مارکنی» مشاهده شد. او اولین خط انتقال را به وسیله رشته‌ای از سیم‌های مسی در سال ۱۹۱۰ ایجاد کرد. در آن زمان، دستگاه‌ها یا سیستم‌های گیرنده فقط تعداد محدودی از گیرنده‌های رادیویی بودند که در جاهای مختلف و جدا از یکدیگر قرار داشتند؛ به این ترتیب مسئله تداخل، مسئله مهمی به حساب نمی‌آمد.

بررسی و تحقیق در زمینه تداخل الکترومغناطیسی، حدوداً از سال ۱۹۲۰ آغاز شد. در این سال‌ها گیرنده‌های رادیویی و آنتن‌ها بسیار ابتدایی بوده، و نسبت به تداخل الکترومغناطیسی ناشی از منابع بیرونی و یا نوسان‌سازهای داخلی خودشان حساس بودند. در سال ۱۹۳۰، تداخل الکترومغناطیسی ایجادشده توسط دستگاه‌های الکتریکی مانند موتورهای، قطارهای برقی و... جزء مشکلات مهم محسوب می‌شد.

در طی جنگ جهانی دوم، استفاده از دستگاه‌ها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی مانند رادیوهای اولیه، دستگاه‌های ناوبری و رادار، رو به افزایش نهاد و همین امر سبب شد که تداخل الکترومغناطیسی در بین آنها بیشتر گردد؛ ولی همچنان با توجه

به محدود بودن تعداد دستگاه‌ها یا سیستم‌ها، انتقال سیگنال‌ها و امواج در طیف‌های فرکانسی خلوت به راحتی صورت می‌گرفت و تداخل نسبتاً کمتر از سال‌های بعد بود. با کشف عناصر الکترونیکی تراکم بالا مانند ترانزیستورهای دوقطبی در دهه ۱۹۵۰، مدارهای مجتمع در دهه ۱۹۶۰ و تراشه‌های میکروپروسسوری در دهه ۱۹۷۰، طیف‌های فرکانسی نیز ازدحام بیشتری پیدا کرد و سبب شد که اشکالات مربوط به تداخل و تشعشعات الکترومغناطیسی به مراتب افزایش یابد. در اواخر دهه ۱۹۷۰ مدارهای پردازش سیگنال‌های دیجیتال به شدت جایگزین مدارهای پردازش سیگنال‌های آنالوگ شد و همه توابع الکترونیکی به وسیله دیجیتال کامل گردید. از آن سال‌ها به بعد با کاربرد بیشتر مدارهای دیجیتال، سرعت در آنها روز به روز افزایش یافت و در نتیجه، تداخل الکترومغناطیسی نیز در آنها به مراتب بیشتر شد.

امروزه نیز مدارهای دیجیتال در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی کاربرد بسیار فراوانی پیدا کرده‌اند و سرعت در آنها نیز روز به روز در حال افزایش است؛ بنابراین طراحی اصولی و استاندارد مدارهای دیجیتال سرعت بالای مربوط به سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی با در نظر گرفتن مسائل مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)، بسیار حائز اهمیت بوده و به همین دلیل به عنوان هدف اصلی این کتاب منظور گردیده است.

مقدمه

سازگاری الکترومغناطیسی، ترجمه فارسی Electromagnetic Compatibility است که به اختصار EMC گفته می‌شود. هدف ما در این کتاب این است که با آگاهی یافتن از مسائل مربوط به EMC، بتوانیم مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (بویژه دیجیتال فرکانس بالا) طراحی کنیم که سازگار با محیط‌های الکترومغناطیسی مختلف باشند؛ یعنی بتوانند در هر محیط الکترومغناطیسی، بدون ایجاد اشکال و تداخل الکترومغناطیسی^۱ به نحو مطلوبی کار کنند.

به عبارت جامع‌تر، می‌خواهیم مدارها یا سیستم‌های طراحی شده دارای سه شرط اساسی ذیل باشند:

اول اینکه قسمت‌های مختلف در داخل آنها برای قسمت‌های دیگر تداخل ایجاد نکنند و در یک محیط بدون نویز، بتوانند به نحو مطلوبی کارکرده و خود سازگار باشند؛ به عبارتی دیگر یک قسمت از مدار از قبیل خط انتقال یا قطعات مختلف، برای قطعات یا مسیرهای حساس دیگر در داخل همان مدار یا سیستم، اشکال ایجاد نکنند و کارکرد آنها را دچار تداخل نسازند.

دوم اینکه مدارها یا سیستم‌های مورد نظر ما به گونه‌ای طراحی شده باشند که خود، مولد نویز برای مدارها یا سیستم‌های موجود در فضای اطرافشان نباشند؛ به عبارتی دیگر، فاقد یا دارای حداقل اندازه گسیلش تشعشی و هدایتی^۲ باشند.

سوم اینکه آنها در محیط‌های الکترومغناطیسی مختلف، حتی محیط‌های پرنویز، کارکرد مطلوبی داشته باشند، یعنی اینکه نویزها یا تشعشعات موجود در فضای اطرافشان، روی آنها اشکال ایجاد نکنند و کارکرد آنها را دچار تداخل نسازند؛ به عبارتی دیگر، فاقد یا دارای حداقل اندازه حساسیت‌پذیری تشعشی و هدایتی باشند.

-
1. Electromagnetic Interference
 2. Radiated and Conducted Emission
 3. Radiated and Conducted Susceptibility

کل این سه حالت ذکر شده، یعنی خودسازگاری مدار، عدم ایجاد تداخل در سیستم‌های دیگر و حساسیت پذیر نبودن یا دچار تداخل نشدن در محیط‌های الکترومغناطیسی مختلف، به «مطلوب بودن EMC» معروف است. به عبارت دیگر، می‌خواهیم اصول و فنون EMC در زمان طراحی مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (بوژه مدارهای دیجیتال سرعت بالا) رعایت شوند تا اینکه بتوانیم به «مطلوب بودن EMC» برسیم.

توجه به مسائل، استانداردهای صحیح و همچنین اصول و فنون EMC در زمان طراحی سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی، می‌تواند از جنبه‌های مختلف بسیار سودمند باشد؛ از جمله اینکه می‌تواند از صرف هزینه‌های بسیار زیاد و اتلاف وقت برای طراحی مجدد (در صورت نداشتن کارکرد مطلوب و بهینه) بکاهد.

اکنون برای واضح شدن «مطلوب بودن EMC» در مدارهای دیجیتال (مربوط به سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی)، به ارائه چند مورد از مثال‌هایی که عدم «مطلوب بودن EMC» می‌تواند اشکالات بسیار زیادی را ایجاد کند، می‌پردازیم:

۱- بارها ممکن است اتفاق افتاده باشد که بعد از صرف وقت زیاد برای طراحی مدار و پیاده‌سازی آن در روی برد مدار چاپی (PCB)، در زمان بهره‌برداری از آن با اشکالات زیادی از جمله کارکرد نامطلوب در محیط‌های مختلف، روبه‌رو شده باشیم. اگر از مسائل، استانداردها، اصول و فنون EMC آگاهی نداشته باشیم، به عبارت عامیانه، عدم کارکرد صحیح مدار را فقط با لفظ «نویز» می‌شناسیم و می‌پنداریم که بر روی مدار یا سیستم مورد نظر ما نویز تأثیرگذار بوده است؛ ولی واقعیت این است که در داخل همین لفظ «نویز»، اصطلاحات متعدد EMC نهفته است که هر کدام دارای اصول، فنون و استانداردهای خاصی برای کاهش و یا حذف، در زمان طراحی مدار یا سیستم هستند. (البته بسیاری از اشکالات در فرکانس‌های بالا پدیدار می‌شوند و ممکن است برای فرکانس‌های پایین، اشکالات زیادی نداشته باشند. با توجه به مباحث روز، بر اساس پیشرفت علم الکترونیک و افزایش سرعت در مدارهای دیجیتال، پردازنده‌ها و... همواره فرکانس‌های بالا مورد نظر و توجه ما هستند).

۱- در بعضی از مواردی که لفظ «نویز» به کار برده شده، صرفاً برای بیان عامیانه مطالب، جهت درک بیشتر مفاهیم است و هر کدام از آنها دارای اصطلاحات تخصصی خاصی هستند که در این کتاب به آنها اشاره خواهد شد.

از دیدگاهی شاید ساده پنداشته شود که توجه نکردن به اصول و استانداردهای EMC در زمان طراحی مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی، غیر از صرف وقت و هزینه‌های زیاد برای طراحی مجدد مطابق با اصول و استانداردها، اشکالات دیگری نداشته باشد؛ ولی اینگونه نیست! همین عدم رعایت اصول، استانداردها و فنون EMC می‌تواند در بسیاری از موارد غیر قابل جبران باشد و خسارات جبران‌ناپذیری را موجب گردد که چند مورد از آنها در ذیل آمده است:

۱- عدم رعایت اصول و فنون EMC در طراحی مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی مربوط به قسمت‌های مختلف یک هواپیما، هلی‌کوپتر، خودرو برقی و... می‌تواند باعث بروز مشکلات عدیده‌ای گردد. برای مثال زمانی که یک هلی‌کوپتر یا هواپیما از نزدیکی فرستنده‌ای یا راداری با تولید امواج الکترومغناطیسی ناسازگار با آن، عبور می‌کند، ممکن است کارکرد قسمت‌های مختلفی از مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی آن دچار تداخل و اشکال گردد؛ در نتیجه، این مسئله می‌تواند حوادث و سانحه‌های هوایی بسیار جدی را به وجود آورده و سبب شود که جان صدها نفر به خطر بیفتد و تبدیل به مسئله‌ای غیر قابل جبران گردد (آمارهای مختلفی در این زمینه موجود می‌باشد).

۲- بارها ممکن است عناوین «جنگ الکترونیک» را شنیده باشیم، اگر سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی در قسمت‌های نظامی و دفاعی یک کشور مطابق با اصول، استانداردها و فنون EMC طراحی و ساخته نشده باشند؛ آنگاه به راحتی می‌تواند با وجود سیگنال‌های نویزدار و ناسازگار، تحت تأثیر قرار گرفته و دچار تداخل و عدم کارکرد صحیح شوند. بنابراین در این صورت، ارتباط ارگان‌های دفاعی و نظامی کشور با یکدیگر دچار اشکال شده و این مسئله می‌تواند به نوبه خود بسیار مشکل‌ساز باشد و آن کشور را حتی تا مرحله شکست پیش ببرد.

علاوه بر موارد بیان‌شده، مثال‌های بسیار ساده و عامیانه‌ای وجود دارند که می‌توانند نقش بسیار مؤثر EMC را حتی در مسائل روزمره نمایان سازند:

۱- مسئله بسیار ساده‌ای که بارها با آن روبه‌رو شده‌ایم، برفک روی صفحه تلویزیون یا اغتشاشات صوتی آن و حتی اغتشاشات صوتی در رادیو، در زمان کارکرد وسیله‌هایی مانند چرخ‌گوشت، ریش‌تراش برقی و... است. این اشکالات می‌تواند به‌خاطر گسیلش

تشعشی و هدایتی از آن وسیله‌ها، و در مقابل، حساسیت‌پذیری تشعشی و هدایتی دستگاه رادیو یا تلویزیون توسط قسمت‌های مختلف‌شان، ایجاد گردد.

گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی- از طریق خطوط برق متناوب (AC)- می‌تواند ناشی از عدم رعایت مسائل مربوط به «فیلترکردن» در قسمت تغذیه سیستم‌ها، و از طرفی دیگر، گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشی نیز می‌تواند به‌خاطر طراحی نادرست و عدم وجود «حفاظ» مناسب در سیستم‌ها یا مدارها ایجاد شده باشد.

۲- مسئله ساده دیگری که بارها مشاهده شده است، آگهی‌هایی مبنی بر خاموش کردن تلفن همراه در هنگام ورود به بانک‌ها یا سازمان‌های خاص است، به‌طوری‌که عدم رعایت این مسئله می‌تواند سبب ایجاد اختلالاتی (تداخل و اشکال) در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (یا ماهواره‌ای) در آن مکان‌ها شود. دلیل این امر نیز می‌تواند ناشی از تشعشع امواج الکترومغناطیسی ناسازگار از تلفن همراه، و در مقابل، حساسیت‌پذیری یا عدم ایمنی سیستم‌های موجود از لحاظ EMC در آن مکان‌ها باشد.

با همه این تفاسیر، برای اینکه مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی طراحی شده با صرف وقت و هزینه‌های زیاد، عاری از هرگونه اشکال باشند، همواره توجه به اصول و فنون EMC در زمان طراحی مدارها یا سیستم‌ها، لازم و ضروری است. بنابراین در زمان طراحی مدار یا سیستم، بایستی یک‌به‌یک به مواردی از قبیل طول مسیر یا خط انتقال، امپدانس مشخصه خط انتقال، سیگنال‌های کلاک (ساعت)، خطوط مربوط به سیگنال‌های کلاک، تداخل سیگنالی (هم‌شنوایی)^۱، نحوه انتخاب قطعات لاجیک (IC) و فنون EMC از قبیل کنارگذاری^۲ و پیوند زدایی^۳، فیلترکردن، قسمت‌بندی کردن^۴، زمین‌کردن^۵ (طراحی سیستم- زمین)، حفاظ‌گذاری^۶ و... توجه بیشتری گردد.

نتیجه اینکه، شناخت در مورد عوامل ایجاد تداخل یا نویز از یک‌طرف و از طرفی دیگر، شناخت و آگاهی از روش‌ها و فنون کاهش آنها در زمان طراحی مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی (بویژه مدارهای دیجیتال فرکانس بالا)، از ارزش و اهمیت بسیار فراوانی برخوردار است.

1. Crosstalk
2. Bypassing
3. Decoupling

4. Partitioning
5. Grounding
6. Shielding

کتاب حاضر، مشتمل بر پانزده فصل می‌باشد که به‌منظور سهولت کار خوانندگان و آشنایی بیشتر آنها با موضوع مورد بحث، در این قسمت، چکیده‌ای از فصول به‌طور جداگانه آورده شده است:

فصل اول: اساس سازگاری الکترومغناطیسی

در این فصل، یک دید کلی از مفاهیم اساسی مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی، به‌همراه استانداردهای موجود در این زمینه در کشورهای مختلف، ارائه خواهد شد.

فصل دوم: گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشی

در این فصل ضمن تشریح گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشی، پیرامون موضوع‌هایی از قبیل جریان‌های مد مشترک و تفاضلی، اندازه‌گیری میدان تشعشی و... بحث خواهد شد. گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشی (گسیلش تشعشی از سیستم‌ها یا مدارها - بردهای مدار چاپی - و همچنین حساسیت‌پذیری سیستم‌ها یا مدارها نسبت به تشعشع) از عوامل ایجاد تداخل هستند؛ بنابراین همراه با بررسی مطالب مختلف در این زمینه به روش‌ها و فنون کاهش آنها نیز اشاره خواهد شد. البته روش کلی برای کاهش یا حذف گسیلش تشعشی از داخل سیستم یا مدار به محیط بیرون و برعکس (حساسیت‌پذیری تشعشی از محیط بیرون به داخل سیستم یا مدار) استفاده از فن «حفاظ‌گذاری» است که در فصل چهاردهم در مورد آن بحث خواهد شد و در این فصل، عواملی که در زمان طراحی سیستم یا مدار مورد نظر هستند و بایستی در زمان طراحی به آنها توجه گردد، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل سوم: گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی

در این فصل، مسائل مربوط به گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی بررسی خواهد شد. در فصل دوم، مسیر انتقال نویز، فضای آزاد است؛ ولی در این حالت، مسیر انتقال به‌جای فضا خطوط برق متناوب می‌باشد؛ یعنی گسیلش نویز از داخل یک سیستم الکترونیکی و مخابراتی به محیط بیرون و یا برعکس (از محیط بیرون به داخل مدار یا سیستم)، از طریق خطوط برق متناوب (خط تغذیه) صورت می‌گیرد که در این فصل، کلیه مطالب مربوط به آنها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل چهارم: مشخصات پنهان قطعات غیرفعال در فرکانس‌های بالا

قطعات غیرفعال مانند مقاومت، سلف، خازن و مسیرهای روی برد مدار چاپی یا سیم‌های رابط، در فرکانس‌های بالا آنگونه نیستند که در ظاهر دیده می‌شوند! بنابراین برای آگاهی کامل از مشخصات و رفتار آنها و همچنین برای در نظر گرفتن مسائل مربوط به آنها در زمان طراحی (به منظور کاهش اندازه تداخل الکترومغناطیسی و افزایش کیفیت عملکرد مدار یا سیستم)، در این فصل مسائل مربوط به مشخصات پنهان قطعات غیرفعال در فرکانس‌های بالا مورد بحث و بررسی قرار داده خواهد شد.

فصل پنجم: قطعات لاجیک و سیگنال‌های کلاک در مدارهای دیجیتال

در این فصل، مشخصات مربوط به قطعات لاجیک از لحاظ اندازه تولید نویز، میزان ایمنی و پارامترهای مهم دیگر، با هدف کاهش اندازه تداخل الکترومغناطیسی در خود مدار یا سیستم و حتی مدارها یا سیستم‌های موجود در محیط اطراف، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت؛ همچنین به منظور آگاهی بیشتر از اندازه گسیلش تشعشعی ناشی از سیگنال‌های متناوب و قطعات لاجیک (به منظور رسیدن به مطلوب بودن EMC)، در این فصل، طیف شکل موج کلاک و هارمونیک‌های آن نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.^۱

فصل ششم: خطوط انتقال

در این فصل، مطالب اساسی و مهم مربوط به خط انتقال (غالباً در روی برد مدار چاپی) از قبیل سیگنال‌های بازتابی، درستی و کیفیت سیگنال در خط انتقال، انواع توپولوژی‌های مسیره‌دهی برای ایجاد یک ساختار خط انتقال (جهت کنترل امپدانس خطوط انتقال یا مسیرهای روی برد مدار چاپی) مانند توپولوژی تک‌ریزنوار، ریزنوار جای داده‌شده و... به همراه روابط مربوط به محاسبه امپدانس مشخصه و تأخیر انتشار سیگنال در آنها، و همچنین مطالب کاربردی دیگر، به طور کامل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۱- منظور از سیگنال کلاک در بخش‌های مختلف این کتاب، یک سیگنال یا پالس دوزنقه‌ای مانند است که در خط یا مسیر کلاک جاری می‌شود، همچنین سیگنال‌های مشابه آن می‌تواند در قسمت‌های مختلف یک مدار دیجیتال از قبیل خط داده‌ها و... جاری شود؛ لذا بررسی‌های صورت گرفته برای سیگنال‌های کلاک، می‌تواند برای هر سیگنال دوزنقه‌ای مانند دیگری نیز صادق باشد.

فصل هفتم: تداخل سیگنالی (هم‌شنوایی)

تداخل سیگنالی، یکی از عوامل مهم ایجاد تداخل الکترومغناطیسی (EMI) در یک مدار یا سیستم الکترونیکی و مخابراتی است. در این فصل، بعد از بررسی انواع پیوند از قبیل پیوند مغناطیسی، الکتریکی و الکترومغناطیسی، مطالب مختلف موجود در زمینه تداخل سیگنالی مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت و سپس روش‌ها و فنون لازم برای کاهش اندازه تداخل سیگنالی با هدف کاهش اندازه تداخل الکترومغناطیسی ارائه خواهد شد.

فصل هشتم: آنتن‌ها و تئوری الکترومغناطیس

با توجه به کاربرد بیشتر آنتن‌ها (در فصل دوم) در مدل‌سازی و اندازه‌گیری گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشعی، در این فصل، مطالب مهم و ضروری به همراه محاسبات و روابط مختلف مربوط به آنتن‌ها ارائه خواهد شد.

[لازم به ذکر است که به دلیل انسجام و پیوستگی مطالب از فصل دوم تا فصل هفتم که غالباً به مطالب مربوط به عوامل ایجاد تداخل الکترومغناطیسی و روش‌های مختلف کاهش آنها اشاره می‌کند، از ارائه کلیه مطالب مربوط به فصل آنتن‌ها در فصل دوم یا فصل بعد از آن صرف‌نظر شده و در این قسمت (فصل هشتم) به ارائه آن پرداخته شده است.]

فصل نهم: بردهای چندلایه

در مدارهای دیجیتال فرکانس بالا، یکی از روش‌های کاهش انرژی نویزدار RF استفاده از بردهای چندلایه است. در این فصل، انواع مختلف بردهای چندلایه (۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ لایه) به همراه طرز قرارگیری لایه‌ها، خصوصیات هر لایه و همچنین خصوصیات مربوط به هر برد به طور کامل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

از فصل دهم تا پانزدهم، روش‌ها و فنون کلی EMC به منظور کاهش (یا حذف) تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و رسیدن به «مطلوب بودن EMC»، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت:

فصل دهم: کنارگذاری و پیوندزدایی

کنارگذاری و پیوندزدایی به جلوگیری از انتقال انرژی نویزدار RF از یک مدار به مدار دیگر اشاره می‌کند و در مجموع سبب افزایش کیفیت سیستم توزیع توان می‌شود. در این فصل برای جلوگیری از اشکالات مربوط به نویز و کاهش تداخل الکترومغناطیسی ناشی از آن، کاربرد خازن‌های پیوندزدا، کنارگذار و بدنه در مدارهای دیجیتال مطرح شده و هرکدام به‌طور کامل مورد بحث و بررسی قرار داده خواهد شد.

فصل یازدهم: فیلترکردن

فیلترها اغلب برای بهبود اشکالات ناشی از نویز که در مرحله اول طراحی بایستی به آنها توجه و از آنها جلوگیری می‌شد، به سیستم یا مدار اضافه می‌شوند. در این فصل، انواع مختلف فیلترها از قبیل فیلترهای بالاگذر، پایین‌گذر، فیلتر RC برای حذف سیگنال‌های نوک‌تیز و... مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت؛ همچنین مطالب مربوط به طراحی فیلتر جهت فیلترکردن نویزهای روی خط تغذیه نوسان‌سازها (مولدهای کلاک) و فیلترکردن نویزهای روی خطوط منابع تغذیه (به‌منظور کاهش گسیلش و حساسیت‌پذیری هدایتی)، تشریح خواهند شد.

فصل دوازدهم: قسمت‌بندی

قسمت‌بندی، عبارت است از تقسیم یک برد مدار چاپی به قسمت‌ها یا بخش‌های مختلف به‌طوری‌که قطعات یا مدارهای زیرمجموعه به‌گونه‌ای در این قسمت‌ها واقع شوند که اندازه تداخل الکترومغناطیسی در آن برد به حداقل مقدار ممکن برسد؛ به عبارتی دیگر، هدف از قسمت‌بندی، جای‌دادن مناسب قطعات یا مدارهای زیرمجموعه در یک برد مدار چاپی به‌منظور به حداقل رساندن تداخل الکترومغناطیسی است. در این فصل، قسمت‌بندی به‌عنوان یکی از فنون مهم EMC در کاهش تداخل الکترومغناطیسی، به‌طور کامل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل سیزدهم: زمین کردن (طراحی سیستم-زمین)

زمین کردن، یکی از روش‌ها و فنون مهم EMC در کاهش تداخل الکترومغناطیسی است. مسئله مهم در زمین کردن، طراحی و استفاده از یک سیستم-زمین مناسب است. یکی از مزایای اصلی سیستم-زمین خوب طراحی شده، محافظت مدار یا سیستم در برابر گسیلش و تداخل الکترومغناطیسی است به طوری که می‌تواند پیوند ناخواسته در بین سیگنال‌ها را به حداقل رسانده یا حذف نماید. در این فصل، مسائل مختلف در مورد زمین کردن از جمله انواع روش‌های موجود برای زمین کردن (طراحی سیستم-زمین)، روش زمین کردن در مدارهای دیجیتال سرعت بالا، کنترل پیوند امپدانس مشترک، حلقه‌های زمین و جداسازی دو مدار برای جلوگیری از ایجاد این حلقه‌ها (توسط مبدل، چوک مد مشترک و جداساز نوری) و همچنین مطالب مربوط به صفحه‌های زمین، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل چهاردهم: حفاظ‌گذاری

حفاظ‌گذاری، یکی از روش‌ها و فنون مهم EMC در کاهش تأثیر نویز به یک مدار، سیستم، قطعه و یا حتی یک سیم است. حفاظ‌ها می‌توانند در اطراف مدارها، سیستم‌ها، قطعات و سیم‌های (کابل‌های) ارتباطی قرار بگیرند. حفاظ‌های مربوط به مدارها یا سیستم‌ها، محفظه‌های فلزی هستند که از مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی در برابر میدان‌ها یا تشعشعات الکترومغناطیسی موجود در فضای اطراف محافظت به عمل می‌آورند؛ به عبارتی حفاظ‌ها، همانند مانعی در برابر انتقال میدان‌ها یا تشعشعات الکترومغناطیسی هستند که سبب افزایش ایمنی در سیستم‌ها یا مدارها می‌شوند.

در حالت کلی، حفاظ‌گذاری یکی از فنون مهم EMC در کاهش تداخل ناشی از تشعشعات الکترومغناطیسی (گسیلش و حساسیت‌پذیری تشعشعی) است و در این فصل، مسائل مربوط به حفاظ، حفاظ‌گذاری و تأثیر آن، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل پانزدهم: پایاندھی مسیر

پایاندھی مسیر، نقش بسیار مهمی در تأمین درستی و کیفیت سیگنال، و همچنین کاهش انرژی نویزدار RF ایفا می‌کند؛ به عبارتی سبب کاهش تداخل الکترومغناطیسی و رسیدن