TECNICHE MODERNE DI PROGETTAZIONE EMC

COMPATIBILITÁ ELETTROMAGNETICA

Il capitolo introduttivo delinea i confini della disciplina, identificandone gli aspetti salienti e una possibile ripartizione in sottoclassi.

Si incomincia con il prodotto e la sua architettura. Il prodotto elettronico è l'oggetto su cui lo specialista applica le nozioni acquisite di EMC.

Si passa quindi ai disturbi e alle interferenze che sono la motivazione per l'esecuzione delle prove e della conseguente necessità di una progettazione EMC dedicata aggiuntiva alla progettazione elettronica tradizionale o, meglio, in essa integrata.

Vengono poi analizzate le varie categorie di test che formano la campagna di omologazione e gli obblighi di legge.

Si lancia anche uno sguardo sulle specifiche di prova che presentano alcune peculiarità rispetto agli altri test di qualifica del prodotto (in particolare una lettura tutt'altro che agevole e immediata).

Infine, per la massima concretezza, sono descritti alcuni esempi di "incompatibilità elettromagnetica" incontrati dall'autore o ricavati dalla letteratura tecnica.

COMPORTAMENTO NON IDEALE DEI COMPONENTI

La compatibilità elettromagnetica rivaluta i componenti passivi che molti progettisti elettronici deprezzano facilmente a fronte degli integrati dell'ultima generazione.

I componenti passivi, banali da comprendere alle basse frequenze, per via dei fenomeni parassiti che crescono con la frequenza, assumono dei comportamenti molto diversi da quelli attesi. Come esempio un condensatore in alta frequenza diventa un induttore e viceversa un induttore diventa un condensatore. Il comportamento non ideale dei componenti passivi, oltre ad essere un interessante oggetto di studio accademico, diventa il pane quotidiano dello specialista EMC che deve destreggiarsi in mezzo a comportamenti altrimenti misteriosi e inspiegabili.

Sono analizzati condensatori, induttori, resistori, trasformatori e ferriti. Anche il più umile dei componenti, il conduttore (alias il cavo o la pista dello stampato) viene modellato in funzione della frequenza con un primo accenno al suo impiego nelle linee di trasmissioni.

Il comportamento reale dei componenti passivi è solitamente preso come esempio della differenza tra un progetto elettronico soltanto funzionale (senza considerare le prove EMC) ed il progetto finalizzato al superamento elle prove EMC che per molti prodotti rappresentano oggi il maggiore scoglio da superare per avviare le vendite.

MASSA E TERRA

C'è molta confusione nell'impiego dei termini terra e massa e, in questo capitolo, si cerca di fare chiarezza separando nettamente le funzioni di sicurezza elettrica da quelle di controllo delle interferenze. Il progettista EMC non può avvalersi degli accorgimenti progettuali introdotti dalla sicurezza elettrica: non può cioè impiegare il filo giallo verde od il terreno per far scomparire i disturbi elettromagnetici. Deve soltanto rispettare quanto già fatto obbligatoriamente per la sicurezza perché un prodotto non interferente, ma non sicuro, non si può vendere.

Si spiega l'evoluzione della massa dal concetto utopistico di linea o superficie equipotenziale a quella attuale di percorso delle correnti di ritorno, sia di segnale che di potenza, ed il progressivo passaggio dallo "star point" applicabile con segnali e disturbi soltanto a bassa frequenza allo schema multipoint applicabile con segnali e disturbi sia a bassa che ad alta frequenza.

Si dimostra infine come si possano gestire i loop di massa che il multipoint porta con sé, spauracchio (a torto) dei progettisti per decenni e ancor oggi argomento in parte tabù in alcuni settori tecnologici.

EQUAZIONI DI MAXWELL

Il capitolo spiega perché si deve abbandonare il metodo dei parametri concentrati a favore della teoria dei campi. Le cinque equazioni (non tutte di Maxwell), sono quindi descritte individualmente in forma semplice e facile a comprendersi.

Dalle equazioni si ricava l'influenza dei parametri del mezzo sulla propagazione dei campi, si deduce la riflessione totale di una onda incidente su un conduttore perfetto e l'equazione delle onde piane uniformi: tutto ciò ci aiuta a capire la propagazione elettromagnetica di campo lontano e quindi le antenne e le linee di trasmissione.

Fatta eccezione per qualche formula inserita soltanto per completezza a favore di chi in seguito approfondirà l'argomento su testi scientifici specialistici, tutti gli argomenti sono spiegati in maniera accessibile senza dimostrazioni matematiche che potrebbero risultare ostiche.

TEORIA DELLE ANTENNE

Visto che un oggetto metallico se opportunamente eccitato si comporta come una antenna, i prodotti elettronici contengono un gran numero di antenne non intenzionali – sia trasmittenti sia riceventi – e sono quindi soggetti ad accoppiamenti irradiati in entrambi gli ambiti di emissione o di suscettibilità.

Per apprezzare le antenne indesiderate, occorre conoscere il comportamento delle varie tipologie di antenne standard e si inizia a familiarizzare con il progetto di alcune antenne, Si parte dai capostipiti, dipolo hertziano e loop, fino ai monopoli e dipoli accordati, alle biconiche, alle logperiodiche, alle schiere di antenne. La conoscenza delle varie antenne servirà anche a chi si dovrà occupare di prove irradiate in camera anecoica in cui si fa uso di diverse antenne trasmittenti e riceventi quasi esclusivamente di campo elettrico.

Si introducono i parametri in uso nei laboratori EMC come il guadagno ed il fattore di antenna. Infine si impara a calcolare il campo emesso in trasmissione o la tensione estratta ai capi dell'antenna in ricezione.

LINEE DI TRASMISSIONE

Quando un collegamento metallico ha dimensioni compatibili con la lunghezza d'onda, questo deve essere trattato come una linea di trasmissione in cui tensione, corrente e impedenza variano da punto a punto. Una riga in uno schema elettrico non è più una linea equipotenziale e la soluzione del circuito passa attraverso la matematica o attraverso un programma di simulazione, tipo SPICE o IBIS, che usano calcoli matematici senza il coinvolgimento dell'utente finale.

Le linee sono studiate in forma semplificata e prendendo il solo modo TEM così da calcolare i parametri della linea per unità di lunghezza in condizioni quasi-statiche e trascurando in molti casi le perdite nel rame e nel dielettrico.

Si ricavano le equazioni differenziali applicabili in tutti i casi (regime e transitorio) con un esempio di soluzione grafica nel dominio del tempo.

Per liberarsi del peso della matematica si approfondisce la sola condizione di regime sinusoidale (con i fasori) nel dominio delle frequenze valutando i parametri di impedenza caratteristica e di velocità di propagazione. Si analizzano poi le riflessioni alle estremità e gli adattamenti con introduzione del parametro di misura della bontà dell'adattamento ROS. Si reintroducono le perdite che attenuano nelle linee sia i segnali progressivi che regressivi.

La teorie dalle linee serve in seguito per lo studio delle diafonie (linee a tre o più conduttori), delle riflessioni nelle schermature con la tecnica proprio delle linee di trasmissione e per il progetto dei circuiti stampati digitali ad alta velocità.

TEORIA DEI SEGNALI

La teoria dei segnali svolge una funzione essenziale nello studio dei segnali ripetitivi. I clock dei circuiti digitali sono segnali ripetitivi e i circuiti digitali sono ovunque quindi la capacità di trasformare forme d'onda dal dominio del tempo a quello delle frequenze e viceversa è diventata di primaria importanza, in particolare oggi con strumenti che hanno capacità di rappresentazione in entrambi i domini (e così, spesso, diventa sempre più difficile riconoscere un oscilloscopio da un analizzatore di spettro).

Il capitolo si occupa degli spettri e delle trasformazioni e anti-trasformazioni di Fourier. L'uso degli spettri serve a ridurre le complicazioni matematiche della trattazione dei segnali nel tempo. Si transita da un dominio all'altro alla ricerca della semplificazione matematica. Le funzioni di base sinusoidali, universalmente conosciute perché studiate alle scuole superiori, costituiscono la base del capitolo.

La teoria dei segnali ci insegna come rappresentare matematicamente funzioni di trasferimento a tratti: una buona parte del capitolo è dedicata alle regole che occorre conoscere per questa rappresentazione.

SCHERMATURA

La schermatura è uno degli strumenti di più largo impiego da parte del progettista EMC e consente infatti di attenuare gli accoppiamenti irradiati fonti di fuori-specifica sia nelle prove di emissione che di immunità.

Viene analizzato in condizioni di campo lontano il meccanismo della schermatura di un foglio metallico, sostituivo di un contenitore metallico la cui forma non consente di trovare equazioni risolvibili in forma chiusa ed in grado di fornire le relazioni tra i parametri in gioco. La semplificazione è utile per confrontare riflessioni ed assorbimenti dei vari materiali metallici e confrontare le attenuazioni sia del campo elettrico e magnetico.

Si rimuove quindi l'ipotesi di campo lontano per avvicinarsi al caso reale di una scheda elettronica contenuta all'interno di un involucro schermante. Evidenziata la difficoltà della schermatura magnetica a bassa frequenza, importante sia per la distribuzione dell'energia elettrica a 50Hz sia per gli alimentatori switching, si individuano le possibili soluzioni ai problemi nella legge di Faraday o nei materiali ferromagnetici.

Ad alta frequenza, aperture e passaggi cavi possono annullare la schermatura dell'involucro conduttivo per cui si analizzano le aperture, dalle fessure del coperchio al nido d'ape della ventilazione, e i conduttori I/O con l'inserimento di filtri e l'uso di guide d'onda. La schermatura è lo strumento gemello del filtraggio e spesso convivono rafforzandosi vicendevolmente; a volte sono alternativi e la scelta cade sulla soluzione a minor costo.

I CIRCUITI DIGITALI

I circuiti digitali sono ovunque. In combinazione con le capacità di uscita e di disaccoppiamento generano disturbi alla frequenza del clock (o doppia del clock) e pertanto a frequenze sempre più alte. Sono la causa di emissioni irradiate, sia di tipo differenziale sia di modo comune.

I due meccanismi di generazione dei campi sono analizzati e si accenna ai primi interventi di contenimento sia sull'induttanza della massa sia su quella dell'alimentazione e di inserimento dei condensatori di disaccoppiamento sugli integrati.

A livello di progetto EMC ne consegue la necessità di aumentare il numero degli strati dello stampato con un piano di massa e, se possibile, un piano di alimentazione. Nel capitolo si studiano gli stampati multilayer e le problematiche delle schede miste in cui devono convivere circuiti digitali aggressivi e circuiti analogici suscettibili.

In generale si sfiorano i problemi di compatibilità interna, quelli che rientrano nella voce "signal integrity", per raggiungere l'obbiettivo finale che è il superamento della prova di emissione irradiata. Signal integrity ed EMC sono due facce della stessa medaglia, ma l'EMC costituisce un problema di più difficile soluzione della signal integrity.

DIAFONIA

La diafonia è uno degli aspetti della compatibilità elettromagnetica più complessi. Riguarda infatti l'interazione dei conduttori con il campo vicino, campo che si è sempre evitato nello studio delle antenne.

L'oggetto è una linea di trasmissione ad almeno tre se non quattro conduttori, aggravata da calcoli matematici più complessi (vedi uso di matrici) rispetto allo studio delle linee a due conduttori.

La matematica e la complessità della materia rendono l'argomento diafonia piuttosto ostico al progettista che si può tuttavia avvalere di programmi di simulazione potenti ma deve comunque conoscere i principi teorici della diafonia per potere sfruttare al meglio gli ausili informatici.

Con alcune semplificazioni si perviene alla soluzione del sistema di equazioni in regime sinusoidale: le semplificazioni consentono di pervenire a formule che legano i vari parametri e ci indicano l'impatto delle variazioni dei parametri in gioco, informazione da cui il progettista muove i suoi primi passi.

Dopo aver calcolato le diafonie di campo elettrico e di campo magnetico nel circuito vittima, vengono introdotti gli schermi (elettrici) dei cavi per l'attenuazione degli accoppiamenti elettrici ed in parte magnetici. Come alternativa o integrazione degli schermi si analizzano le linee twistate e le linee bilanciate per l'attenuazione del campo magnetico ed anche elettrico.

EMISSIONI CONDOTTE

Il capitolo inizia con la descrizione della LISN e delle sue molte funzioni.

Viene quindi sviluppato un esempio completo di progetto di alimentatore switching tipo flyback esportabile a qualunque altro tipo di alimentatore. Il progetto inizia con la dimostrazione della assoluta necessità di un filtro di rete che attenui le elevate emissioni condotte generate dal PWM.

Segue la ricerca dei parametri mancanti (attenuazione e impedenza di sorgente) della specifica del filtro. Non si può avviare un progetto se non sono prima definiti i requisiti. Il dimensionamento del filtro si svolge dalla sezione di modo comune, choke più condensatori Y, a quella di modo differenziale, induttanza di leakage e condensatore X.

Dei filtri vengono messe in evidenza le criticità al crescere della frequenza e alla collocazione su scheda o nel contenitore schermato del prodotto. Si analizzano anche le problematiche dei filtri commerciali spesso legate alla mancanza di informazioni sulle prestazioni nelle condizioni di esercizio. Non sono trascurate le commutazioni dei diodi ed i disturbi ad alta frequenza da essi generati.

L'esempio illustrato segue una procedura sequenziale. Il progettista elettronico che non si è specializzato nel progetto del filtro, può essere così guidato partendo dalla istruzione iniziale o seguendo il flusso delle istruzioni con inizio da un punto intermedio (come esempio se il test indica che ci sono soltanto emissioni condotte di modo comune o soltanto differenziali).

Un accenno finale ai motor drive e agli inverter riconferma, in applicazione spesso ancora più impegnativa, la validità della procedura di progetto suggerita per l'alimentatore.

EMISSIONI IRRADIATE

Il capitolo spiega i meccanismi di generazione dei campi irradiati dalle correnti di modo differenziale e di modo comune. Per ciascun tipo di stimolo, separatamente, crea una procedura di progetto mostrando in sequenza le possibile opzioni a disposizione del progettista per il contenimento del campo elettrico misurato dall'antenna ricevente in camera.

Per il modo differenziale si parte dalle variazioni della geometria al contenimento della corrente di esercizio e dell'area da questa concatenata. Altre possibilità sono offerte dalla tecnica dello spread spectrum o dallo sfruttamento in vari modi delle ridondanze per poi concludere nei casi più recidivi con la schermatura globale.

Per il modo comune il progetto parte dalla minimizzazione dell'induttanza della massa, dalla creazione di una area di I/O quieta e dalla realizzazione di una massa chassis efficiente nel posto giusto. La riduzione delle correnti nei cavi che causano sforamenti dalla maschera delle emissioni irradiate può poi avvenire con tecniche di filtraggio, sia con choke di modo comune che con condensatori su massa. Extrema ratio, se anche lo spread spectrum non risultasse sufficiente a contenere le emissioni, la schermatura globale.

IMMUNITÁ RF

L'immunità sinusoidale presenta uno scenario molto diverso dalle emissioni perché gli attori non sono più componenti che commutano bensì componenti analogici a basso livello di segnale.

Il capitolo illustra le grandi differenze tra le due tipologie di prove, introduce per l'immunità il criterio di accettazione che non esiste per le emissioni e spiega come disturbi ad alta frequenza possano impedire il corretto funzionamento di componenti che hanno bande di frequenza spesso limitate ai kHz.

I disturbi iniettati nelle prove sono principalmente di modo comune per cui occorre studiare la conversione CM-DM alla base delle suscettibilità. Vengono illustrati il CMRR e le line bilanciate che respingono i disturbi di modo comune.

Gli interventi progettuali spaziano dalle schermature dei cavi (per le prove irradiate), ai filtri di modo comune, choke più condensatori collegati al contenitore e filtri differenziali sui componenti più delicati.

IMMUNITA' AI TRANSITORI CONDOTTI

Le prove che si analizzano sono quelle di burst e di surge.

Gli interventi più peculiari sono quelli che usano i soppressori di impulsi. I soppressori sono studiati nelle due applicazioni tenendo in considerazioni i molti parametri in gioco. Sono visti come l'insieme di un componente serie ed un componente parallelo, simili ai filtri a gamma rovescio che spesso sostituiscono per contenere i picchi impulsivi molto forti. L'EMC impone vincoli alle induttanze serie dei diodi e al filtraggio anche delle linee di ritorno dei segnali.

Per i burst si forniscono i requisiti che i soppressori delle linee digitali devono rispettare. Tra gli altri prevale la capacità parassita che deve essere minima per flussi di dati veloci (USB, Ethernet...). Per i surge, in considerazione delle elevate energie in gioco, si utilizzano componenti diversi.

La collocazione corretta dei soppressori è essenziale per la loro efficacia. Se insufficienti, un filtro differenziale all'ingresso del componente critico (linea di reset o interrupt) può essere risolutivo. Si accenna infine all'impiego di combinazioni di due soppressori diversi per far fronte contemporaneamente a impulsi veloci ed impulsi energetici.

LE SCARICHE ELETTROSTATICHE

Il capitolo descrive in dettaglio il fenomeno delle cariche e delle scariche elettrostatiche. I componenti elettronici, siano essi analogici o digitali, attivi o passivi, sono sensibili in vario grado alle scariche elettrostatiche e la miniaturizzazione di componenti è garanzia di una suscettibilità ancora maggiore nel prossimo futuro.

L'ESD è uno degli aspetti più difficili dell'EMC perché le cariche elettrostatiche si accoppiano in tutti i modi, sia condotti sia irradiati, per cui il progetto che le tenga lontano dai componenti sensibili si complica parecchio e anche perché le frequenze in gioco sono molto alte e non è facile prevedere gli effetti parassiti di tutti i percorsi a 500MHz.

Sono indicate le due scuole di pensiero, il "tutta plastica" ed il "tutto metallo" con evidenziazione di vantaggi e svantaggi delle due tecniche. Si sottolinea l'importanza del bonding delle scatole metalliche, delle aperture sia in contenitori metallici che plastici, della propagazione ai dispositivi connessi all'EUT, dello chassis ground delle schede interne, del filtraggio dei segnali al loro ingresso nel contenitore, al foglio metallico per le schede in contenitori non schermanti.