Marco Dealessi
Alessandro Corniani

Tecniche moderne di progettazione EMC

In memoria di Angelo e di Roberto che hanno condiviso con me per molti anni l'avventura nel mondo dell'EMC.

Marco

Prefazione

Mi è stato chiesto da più parti di mettere su carta le esperienze che ho accumulato in alcuni decenni di lavoro dedicati principalmente alla soluzione di problemi di "incompatibilità" elettromagnetica.

Durante l'attività lavorativa ho incontrato molti progettisti elettronici alle prese con problemi similari, spesso in grosse difficoltà per la mancanza di esperienza, ma anche di metodologia e talvolta anche di cultura.

Ho realizzato quindi di aver avuto un percorso professionale tanto fortunato quanto raro perché ho potuto concentrarmi a lungo e con il tempo necessario sugli aspetti della compatibilità elettromagnetica sui quali molti colleghi si trovano oggi a dover trovare in modo estemporaneo soluzioni in tempi brevissimi senza la necessaria preparazione. Ad essi indirizzo questo documento, con l'augurio che possa essere loro di aiuto ed alleviare gli sforzi che compiono per arrivare all'esito positivo delle prove EMC.

Le nozioni di base della compatibilità elettromagnetica sono consolidate da lungo tempo. Esistono in commercio molti testi dedicati all'argomento, ma sono praticamente tutti rivolti agli studenti dei corsi universitari di ingegneria elettronica. Ne cito alla fine del libro alcuni che mi sembrano più vicini alle necessità dei progettisti che vogliano approfondire la loro conoscenza teorica molto oltre il livello superficiale del presente libro.

Non essendo quindi possibile mettere molta farina del mio sacco (non si può reinventare "l'acqua calda") ho rimesso insieme il materiale reperibile in biblioteca aggiungendo qualche trucco del mestiere e dando al testo un taglio particolarmente pratico.

Scusandomi per il linguaggio adottato, spesso poco scientifico, ma di facile comprensione, esprimo la speranza di aver raggiunto lo scopo che mi ero prefissato in risposta alle sollecitazioni ricevute dall'esterno. Nell'organizzazione del testo, ho cercato l'approccio più semplice e progressivo alle conoscenze dell'EMC.

Il volume è organizzato in modo logico. L'introduzione alla compatibilità elettromagnetica può essere utile a chi affronta la tematica per la prima volta. Il tecnico con un minimo di esperienze può passare oltre senza correre il rischio di perdersi.

I temi principali dell'EMC, dalle equazioni dei campi, alle antenne, alle linee, agli spettri, alle schermature, agli stampati, ai circuiti logici seguono con la sequenza che risponde all'ordine mentale dell'autore al fine di minimizzare l'impatto psicologico del confronto con uno scalino di conoscenza troppo brusco.

I cinque temi, dedicati ciascuno ad una classe di prove EMC, sono parzialmente autonomi perché corredati nelle rispettive appendici delle nozioni essenziali per la loro comprensione. Chi andasse di fretta può "saltare" tutti i capitoli precedenti e seguire soltanto gli aspetti di progettazione dei singoli capitoli.

L'autore suggerisce comunque, anche a chi deve correre, di tornare indietro, magari un po' alla volta, per rinfrescare le nozioni teoriche che ad un buon progettista non fanno certo male.

Gli autori
Marco Dealessi
Alessandro Corniani

La compatibilità elettromagnetica

In questo capitolo si cerca di definire la compatibilità elettromagnetica e gli impatti che essa esercita sulla progettazione elettronica e sulla omologazione dei prodotti.

L'argomento compatibilità elettromagnetica (in inglese EMC: Electro Magnetic Compatibility) è estremamente vasto ed è facile, entrandoci, smarrire la strada. Il testo seguente intende limitare la conoscenza dell'argomento al minimo necessario al progettista elettronico per il superamento delle prove di omologazione.
All'esecutore materiale delle prove, che spesso è persona diversa dal progettista, vuole invece fornire la consapevolezza di quello che sta facendo non limitandolo alla esecuzione, parola per parola, di quanto scritto nella specifica della prova, ma consentendogli di comprenderne ragioni e motivazioni.
La denominazione "compatibilità elettromagnetica" è già una definizione: l'aggettivo "elettromagnetica" che qualifica il sostantivo "compatibilità" limita l'analisi all'ambiente elettromagnetico.

Per il progettista elettronico l'elettromagnetismo è l'insieme di due mondi: i circuiti che ha studiato come componenti passivi alla voce "elettrotecnica" e perfezionato con i componenti attivi propri dell'elettronica e la propagazione dei campi nello spazio attorno ai circuiti, più in dettaglio affrontata sotto la voce "radiazione".
I due mondi sono tenuti insieme dal punto di vista teorico dalle equazioni di Maxwell ed in pratica collegati dalle antenne cioè da dispositivi doppi-bipoli provvisti di una porta elettrica che si affaccia su un circuito ed una porta elettromagnetica che si affaccia sullo spazio contenente il campo. Per la verità la separazione tra circuiti e spazi liberi come la scissione in prove condotte ed irradiate è arbitraria e risponde alla necessità di semplificare un problema complesso in due di più agevole soluzione.

Se l'oggetto del nostro interesse è un dispositivo elettronico, che chiameremo anche prodotto con riferimento alla sua immissione sul mercato dopo (e previo) esito positivo delle prove, possiamo sicuramente affermare che deve essere "compatibile", ai fini elettromagnetici, con l'ambiente circostante in cui gli è richiesto di operare.
Non deve funzionare correttamente soltanto nel laboratorio dell'azienda costruttrice, ma deve svolgere tutte le funzioni per le quali è stato acquistato anche nelle mani del compratore convivendo con l'ambiente che gli sta attorno. La compatibilità con l'ambiente equivale alla compatibilità con tutti gli altri dispositivi elettronici che condividono il requisito di compatibilità ambientale. Allora il nostro dispositivo dovrà evitare di disturbare gli altri dispositivi con un eccesso di emissioni elettromagnetiche e non essere a sua volta disturbato dalle emissioni elettromagnetiche degli altri dispositivi a tal punto da cessare di funzionare correttamente.

I tre capitoli dell'EMC

La convivenza con l'ambiente introduce i primi due capitoli e cioè il contenimento delle emissioni e l'irrobustimento nei riguardi delle minacce elettromagnetiche. Ne esiste tuttavia un terzo che, a prima vista, non sembra legato all'EMC.

Supponiamo che già in fase di test funzionali il dispositivo mostri dei malfunzionamenti. Viene subito da pensare a un errore della progettazione che non ha correttamente interpretato i requisiti funzionali della specifica di sviluppo.
Approfondendo l'analisi si scopre che il problema è l'interferenza interna creata da un circuito di potenza su un circuito di segnale. Non c'è di mezzo la compatibilità con l'ambiente esterno per il dispositivo completo, ma la causa del cattivo funzionamento e del non rispetto della specifica funzionale risiede nella incompatibilità (elettromagnetica) tra due circuiti interni. Scendendo dal livello del prodotto a quello delle sue parti, cioè dei suoi circuiti, osserviamo come per il singolo circuito il problema sia di compatibilità con un circuito a lui esterno.
Il problema è quindi pienamente di compatibilità elettromagnetica, ma a un livello gerarchico inferiore a quello del prodotto finito a cui si riferiscono i primi due aspetti dell'EMC.

Riassumiamo quindi i tre capitoli della compatibilità elettromagnetica:
- Emissione
- Immunità
- Compatibilità interna

Emissione e immunità riguardano l'interfaccia del prodotto ed i problemi relativi vengono a galla durante la campagna di prove EMC, la compatibilità interna riguarda invece ciò che definiamo come "intrafaccia" e si verifica già nelle prove funzionali (spesso interne e non ufficiali) che tipicamente precedono come sequenza temporale le qualifiche EMC.

Il precedente accenno alla possibile incompatibilità interna ci consente di far notare come il progetto elettronico si componga di più livelli:
- sistema: ad esempio l'elettronica di bordo di una automobile
- dispositivo: ad esempio un televisore
- scheda elettronica: ad esempio un alimentatore
- componente: ad esempio un circuito integrato

I componenti insieme formano una scheda, una o più schede formano un dispositivo, uno o più dispositivi formano un sistema.

La compatibilità elettromagnetica riguarda, potremmo dire allo stesso modo, tutti e quattro i livelli gerarchici oltre ad altri livelli intermedi che ci possiamo inventare. Quando progettisti diversi operano su livelli diversi, sarebbe opportuno che si potessero parlare in modo da uniformarne l'approccio alla EMC. Molto spesso ciò

non accade ed il progetto appare non omogeneo (anche se perfettamente funzionante), ma è importante che per lo meno il progettista del livello n abbia la percezione di come sono stati affrontati i problemi EMC del livello n-1 e n+1 (se esistono).

Come esempio diciamo che il sistemista non è uno specialista circuitale, ma deve avere una infarinatura del comportamento EMC dei circuiti perché all'occorrenza del primo problema possa seriamente discutere con il progettista dei singoli dispositivi, soprattutto se sviluppati da aziende esterne. Spesso la soluzione ad un problema EMC avviene unendo le competenze associate ad almeno due livelli gerarchici. Nella catena ci deve comunque sempre essere una qualche forma di collegamento tra i responsabili tecnici dei vari livelli.

Accoppiamenti

Perché esista una incompatibilità, cioè un problema di compatibilità che richiede una soluzione, occorre che ci sia una interferenza ovvero un'emissione che disturbi un dispositivo. L'emissione può essere eccessiva, il che motiva giustamente il malfunzionamento del dispositivo, o il dispositivo può essere intrinsecamente troppo debole anche a fronte di un disturbo ricevuto di livello non eccessivo.
Qualunque ne sia l'origine, l'interferenza, per esistere, ha bisogno di due attori principali: il dispositivo sorgente e il dispositivo vittima.

La presenza dei due attori è condizione necessaria, ma non sufficiente. Occorre ancora che ci sia un legame e cioè che il disturbo emesso dalla sorgente arrivi alla vittima per renderla tale. Occorre quello che chiamiamo accoppiamento. Senza accoppiamento il disturbo emesso resta uno dei tanti disturbi esistenti nell'ambiente e non crea l'interferenza.

La compatibilità si occupa, come già anticipato e come vedremo in dettaglio studiando le antenne, di circuiti, cioè di tensione V e intensità di corrente I, e di campi elettromagnetici, cioè campo elettrico E e campo magnetico H.

Il disturbo può raggiungere la vittima tramite un filo cioè per via condotta, o per il tramite della propagazione in aria cioè per via irradiata. La distanza tra sorgente e vittima non è sempre importante perché i campi si propagano a grandi distanze e la compatibilità ambientale non riguarda un'area soltanto locale. Come esempio un trasmettitore FM può interferire con un dispositivo che si trova a qualche chilometro dall'antenna trasmittente. Naturalmente la vicinanza favorisce gli accoppiamenti (i campi si riducono con la distanza) e la maggior parte dei problemi di compatibilità deriva dalle sempre crescente densità di dispositivi elettronici accostati gli uni agli altri.

Abbiamo identificato tre fattori su cui dovremo lavorare: sorgente, vittima e accoppiamento. Di quest'ultimo abbiamo due tipi: per via condotta e per via irradiata.

Ricaviamo quindi per combinazione i possibili test: emissione condotta, emissione irradiata, immunità condotta e immunità irradiata.
A questi infine aggiungiamo, tenendolo un po'segregato, anche il test di scariche elettrostatiche che non sappiamo catalogare esattamente in quanto combinazione di una prova di immunità condotta ed una di immunità irradiata.

A questi cinque argomenti dedicheremo i paragrafi principali sulla metodologia di progettazione nella seconda parte del documento. In realtà tratteremo insieme immunità condotta ed immunità irradiata, dedicando invece un capitolo separato alla immunità transitoria, per un totale comunque sempre di cinque analisi separate.

Disturbi ed interferenze

Conviene chiarire meglio cosa si intenda con i termini "disturbo" e "interferenza". Se per disturbo è universalmente inteso il riferimento ad un segnale non utile (non desiderato), possiamo dire che i disturbi sono dappertutto e le sorgenti di disturbo non mancano di sicuro. Addirittura un segnale utile come una trasmissione radio AM diventa un disturbo per un dispositivo elettronico che non sia un apparato radio ricevente. E può costituire un disturbo anche per un apparato radio ricevente, se sintonizzato su un canale diverso dall'AM.

Non possiamo quindi fare la guerra ai disturbi in generale. Quando il disturbo ostacola il corretto funzionamento di un dispositivo trasformandolo in una "vittima", allora parliamo di interferenza e diventa necessario un intervento a rimedio del problema. L'interferenza è un livello di disturbo sopra la soglia di accettabilità.
Abbiamo quindi detto che non possiamo fare la guerra ai disturbi (al massimo ingaggiamo qualche battaglia) ma possiamo e dobbiamo fare la guerra alle interferenze. La guerra ai disturbi è persa in partenza, quella alle interferenze si può e si deve vincere. Una volta abbattuto il livello del disturbo con l'eliminazione della interferenza occorre fermarsi perché l'eliminazione totale del disturbo è spesso impossibile o antieconomica e quindi inutile (non siamo dei Don Chisciotte).

Le regole della compatibilità fissano i livelli dei disturbi che le sorgenti possono emettere ed i livelli di immunità che le potenziali vittime devono presentare. É compito delle autorità che scrivono le specifiche di prova definire dei livelli corretti e coerenti con la realtà. Di mezzo c'è l'ambiente (cioè l'accoppiamento) su cui a volte si può agire, ma che nei test viene standardizzato sotto forma di distanze, polarizzazioni, posizioni reciproche…

Le prove EMC

Abbiamo già introdotto i cinque test fondamentali. In realtà l'omologazione di un prodotto passa attraverso un numero di test maggiore di cinque. Innanzi tutto perché se cinque sono le classi o le tipologie di test, all'interno di una classe possiamo trovare più fenomeni di disturbo diversi (ad esempio un "burst" è diverso da un "surge" come un "fast transient" è diverso da un "load dump" per cui i test che ne verificano la conformità sono distinti anche se rientrano entrambi nella categoria delle prove di immunità condotta transitoria).

Se guardiamo ai disturbi reali dobbiamo riconoscere che alcuni sono "normali" cioè possono essere presenti con continuità. Altri sono "abnormal" cioè meno consueti, ma comunque presenti occasionalmente e da non trascurare. Altri riguardano bande di frequenza limitate o fenomeni specifici. Diciamo che, tenendo conto dei disturbi reali che si cerca di standardizzare nelle prove, una campagna di omologazione richiede il superamento di più di cinque test, con un numero totale che dipende dalla tipologia di prodotto, ma è prossimo a dieci più che a cinque. La quantità di test assume una propria importanza per via degli investimenti associati alla strumentazione, del tempo di set-up oltreché di esecuzione (fattori che crescono con il crescere del semplice numero di prove al di là del peso delle singole prove che non è il medesimo) e della quantità di incubi che il progettista subisce nel dubbio di non superarli.

Viene spontanea la domanda: se ho superato nove prove e ho dimostrato che il mio progetto è valido, posso evitare la decima prova? La risposta è assolutamente negativa perché ogni prova si riferisce ad un tipo specifico di disturbo e non essendoci sovrapposizione tra i disturbi non c'è sovrapposizione (cioè ridondanza) tra le prove. É possibile fallire la decima prova dopo aver brillantemente superato le prime nove. Ovviamente un progetto che supera agevolmente molte prove ha più probabilità di superare le rimanenti di un altro progetto cha ha fallito tutte le prove che ha tentato. Semplicemente perché un buon progetto è differente da un cattivo progetto nel riguardo dell'ostacolo rappresentato dalle prove EMC.

Non è comunque possibile praticare uno sconto di prova, senza motivazioni tecniche forti, ad alcun dispositivo, anche quello meglio progettato del mondo.

Il progetto EMC

L'esperienza insegna che se non si esegue un progetto ad-hoc le prove EMC non si superano o, meglio, qualche prova EMC sarà fallita con conseguente impossibilità di omologare il prodotto. In seguito si darà anche una evidenza numerica del fatto che il progettista elettronico non può prescindere dalle regole che troverà nei capitoli dedicati alla progettazione per le singole prove.

Se consideriamo come progettazione elettronica la progettazione che ignora l'EMC possiamo immaginare il progettista in "braghe di tela" nel momento in cui gli viene comunicato l'esito negativo di una prova. Non avendo fatto niente in precedenza, quando ne aveva l'opportunità, per superare la prova, non saprà che pesci prendere. Il progetto che nasce all'improvviso e dettato dal panico è esattamente il contrario del progetto vincente che è invece organizzato e programmato.

La compatibilità deve essere progettata fin dall'inizio del progetto. Lo dice la teoria del ciclo di vita secondo la quale il costo di un prodotto dipende fondamentalmente dalle fasi iniziali, quelle nelle quali vengono prese le decisioni di base. L'EMC non costituisce eccezione.

Gli interventi correttivi hanno un costo crescente nel tempo. Quello che può non costare nulla all'inizio, quando tutte le soluzioni sono ancora possibili a costi comparabili (quelle giuste e quelle sbagliate) ha un costo sempre crescente se evidenziato e reso necessario (come aggiuntivo) in seguito.

Pensate a quanto può costare un riprogetto o una modifica a seguito della mancata omologazione, con il reparto produttivo già impegnato nella pre-serie che si trova nella necessità di dover stoppare la sua attività. O ancor peggio se si è evitato (scorrettamente) di eseguire le prove ed il problema si manifesta quando i clienti restituiscono all'assistenza il prodotto che non funziona a causa di interferenze.

L'EMC è una disciplina al pari della meccanica, dell'ottica, dell'affidabilità, della manutenibilità... con la complicazione aggiuntiva di essere poco intuitiva. Già l'elettronica è poco visibile e poco captabile dai sensi rispetto, ad esempio, alla meccanica. Per vedere qualcosa dobbiamo attrezzarci con strumentazione sofisticata tipo oscilloscopio veloce o analizzatore di spettro ed essere certi di quello che stiamo facendo. La compatibilità si riferisce poi ai comportamenti non ideali (per ideali intendiamo quelli studiati a scuola e quindi noti) dei componenti, comportamenti che non figurano negli schemi elettrici che il progettista consegna alla produzione. A prima vista sono opinabili a fronte di molti altri anch'essi plausibili. Sicuramente la compatibilità ha un "fascino" di mistero che può trasformarsi in un "incubo".

In una grande azienda al formarsi del team di progetto lo specialista EMC affianca i progettisti elettronici al pari dello specialista di meccanica, di affidabilità… Nelle piccole aziende, in cui il progettista è tuttofare, deve sobbarcarsi anche l'onere di comprendere e applicare i rudimenti della compatibilità per conseguire il risultato finale che è e resta il superamento delle prove.

Con il "time-to-market" sempre più corto ed economicamente più importante, l'aver impostato il progetto su solide basi EMC dall'inizio, consente di rendere minime le rilavorazioni ed i ricicli (modifiche al prodotto e ripetizione di prove) consentendo l'immissione anticipata sul mercato, elemento sempre più fondamentale per il successo commerciale del prodotto medesimo.

Le specifiche

Una caratteristica della compatibilità è l'esistenza di una moltitudine di parametri che influenzano il risultato di un test. Scopo della specifica di prova è di renderla standard, cioè di assicurare la ripetitività dei risultati, ovunque la prova sia eseguita ed in qualsiasi tempo. La presenza di così tanti fattori influenti sul risultato obbliga i normatori a scrivere specifiche molto dettagliate, tipicamente di un centinaio (o quasi) di pagine ciascuna.

Come esempio la specifica della prova di emissione irradiata è, come parecchie altre, molto corposa. La sua applicazione obbliga alla conoscenza di una seconda specifica (CISPR16) che è costituita da un numero considerevole di altre specifiche… Ogni specifica deve essere letta parola per parola più volte per poterne trattenere almeno gli elementi essenziali. Ogni parola ha un suo peso, altrimenti sarebbe superflua e non comparirebbe nella specifica.

Il progettista deve quindi esercitare uno sforzo notevole per sapere cosa deve fare prima di incominciare la fase di attività pratica cioè il progetto dei circuiti.

Altra caratteristica anomala, sempre dipendente dai molti (troppi) fattori, è che non esiste una specifica di progetto. Al progettista si dice: la tua specifica di sviluppo è la specifica di prova. Progetta in modo da superare la prova.

É una notevole complicazione rispetto ad altre discipline, anche difficili, ma non quanto la compatibilità. Come esempio prendiamo la termotecnica. La specifica termica di un dispositivo elettronico può essere contenuta in un paio di righe: "il prodotto deve funzionare dalla temperatura t_1 alla temperatura t_2 e deve poter essere conservato spento da t_3 a t_4".

La specifica che fissa il traguardo del progettista è (semplificando, ma non troppo) tutta qui. La specifica di prova potrebbe invece essere: "il prodotto deve stare in camera acceso per tot ore alle temperature min e max con passaggio tra le due a gradiente predefinito e deve stare spento alle temperature min e max per tot giorni"

La differenza tra questa coppia di specifiche e la EN55011 (o 022 o 014…) con annessa CISPR16 appare subito evidente. Non è soltanto la complessità che salta all'occhio, ma la differenza tra la concretezza (come si avverte ai sensi) delle specifiche termiche e la fumosità (ma c'è anche molto arrosto) con cui si presenta di primo acchito la specifica EMC.

Esempi di compatibilità difficile

Nei libri si trovano molti esempi di incompatibilità, da quelli delle origini della storia dell'EMC riguardanti le trasmissioni radio AM, ai presunti incidenti aerei causati da perdita dei controlli di volo per via di disturbi elettromagnetici, ai danni causati dai fulmini (sono sempre disturbi elettromagnetici naturali, anziché "man-made") fino al disastro della portaerei in cui una tensione indotta su un cavo da effetti elettromagnetici ha prodotto più di 100 vittime dell'equipaggio.

Per curiosità riportiamo alcuni casi apparentemente strani registrati dall'autore.

Il primo caso non è propriamente di oggi: il pilota collaudatore di un elicottero da combattimento, appena sceso dall'aeromobile, con lo sguardo spiritato riferiva prima della stesura del rapporto ufficiale scritto di aver perso tutti i razzi di un lanciarazzi in prova. E non sapeva dove erano finiti avendoli visti partire senza aver dato alcun comando all'intervallatore che li avrebbe dovuti abilitare.

Su una vettura in commercio si sentiva sulla radio di bordo il rumore del motore, cioè un rumore di fondo proporzionale ai giri motore e alle accelerazioni. Non esattamente il massimo per il sistema di "infotainment" pubblicizzato dal marketing dell'azienda produttrice.

Una pedana (tapis roulant) per jogging in una palestra funzionava soltanto se orientata sull'asse nord-sud. Sistemata inizialmente con un diverso allineamento si rifiutava di ricevere comandi da un telecomando manuale.

Una villa momentaneamente disabitata, immersa nel buio della notte di ferragosto, segnalava via telefono esserci un allarme di effrazione. Al coraggioso (l'autore, che coraggioso è fino a un certo punto), che si avvicinava con cautela, appariva il cancello automatico che si stava chiudendo, come se i ladri dopo aver svaligiato la casa si fossero appena allontanati. Due falsi allarmi dovuti a qualche perturbazione magnetica locale non identificata.

Nel parcheggio di un aeroporto un modello di vettura all'epoca in produzione non riavviava il motore. Trainata in officina, un po' discosto dal piazzale dell'aeroporto, la vettura non mostrava il minimo segno di guasto.

Negli USA sui grandi ponti scorrevoli alcuni veicoli spengono il motore quando sotto passano i pescherecci (con il radar acceso).

Toccando il pannello di comando di una grande gru vicino ad aeroporto militare, la mano diventava viola ed il pannello scottava.

I casi precedenti differiscono molto uno dall'altro, ma sono tutti riconducibili a cause di natura elettromagnetica. Il rispetto dei requisiti di prova che il progettista deve avere sempre costantemente davanti agli occhi nel periodo di sviluppo del prodotto, riduce al minimo la casistica. I normatori prendono spunto infatti dai casi reali per rinforzare i requisiti di prova, ove ce ne sia bisogno, modificandoli continuamente al fine di assicurare la compatibilità fra tutti i sistemi e apparati elettrici-elettronici. In considerazione dell'evoluzione delle specifiche è sempre importante, avviando un nuovo progetto, verificare l'edizione delle specifiche applicabili a quel progetto.

Gli obblighi di legge

L'omologazione dei prodotti elettronici è in Europa ed in Italia un obbligo di legge. Il prodotto non può venire commercializzato se non ha superato tutte le prove EMC. Il superamento delle prove è presunzione di conformità e abilita la vendita. La responsabilità del costruttore non termina tuttavia con la omologazione perché se nella vita reale il prodotto dovesse trovare condizioni operative peggiori di quelle simulate nelle prove, pur non avendo più responsabilità civile o penale, per questioni di immagine il costruttore dovrebbe ancora supportare con la sua esperienza il cliente nella soluzione dei problemi rilevati. Il cliente resta responsabile legalmente della ricerca della soluzione (ad esempio lo spostamento della vittima più lontano dalla sorgente), ma la sua scarsa competenza giustifica ampiamente l'intervento in suo soccorso da parte del progettista.

Il futuro

Già oggi il progettista deve affrontare molte difficoltà. Oltre a quelle di comprensione dei fenomeni elettromagnetici, c'è il fatto innegabile che spesso la soluzione EMC è conflittuale con il funzionamento migliore del prodotto. Come esempio citiamo che il miglior rendimento energetico di sistemi a commutazione richiede switch velocissimi. Per la compatibilità sono un handicap. Molte volte l'EMC tira in direzione contraria al buon progetto elettronico. Poiché tuttavia un buon progetto elettronico è inutile se il prodotto non supera le prove EMC, è indispensabile che il progettista cerchi e trovi un compromesso senza ostacolare il progresso tecnologico che è di per sé positivo. Oggi è possibile.

Analogamente per la sicurezza. Spesso la migliore soluzione al problema di compatibilità non si sposa con le esigenze della sicurezza elettrica. In questo caso il progettista deve chinare il capo perché il prodotto prima deve essere sicuro e poi avere il pieno controllo dei disturbi elettromagnetici. Un prodotto insicuro non si può vendere e non si deve usare. Con la sicurezza non esiste compromesso: prima la sicurezza poi il controllo del rumore.

E domani? Il compromesso sarà sempre possibile?
Sul domani abbiamo degli interrogativi perché la maggior parte degli sviluppi tecnologici remano contro l'EMC. Eppure non avrebbe senso per il progettista EMC scartare i vantaggi della tecnologia, anche se avesse la libertà di scelta.
Si può dire che il raggiungimento del compromesso sarà sempre più impegnativo e richiederà al progettista elettronico una sempre migliore competenza sugli effetti elettromagnetici.

Come esempio di sviluppi tecnologici che mettono a dura prova le prestazioni EMC è sufficiente citare l'aumento delle frequenze per la legge di Moore (gli accoppiamenti crescono con la frequenza), la riduzione delle tensioni di alimentazione (si riducono le differenze di livello tra un 1 logico ed uno 0 logico),

l'aumento delle potenze RF disponibili (sempre più emissioni), il crescente livello di integrazione dei componenti con dimensioni sempre più piccole (minori tensioni di rottura, minore capacità di assorbire calore, più vicinanza e più suscettibilità, maggiore sensibilità alle scariche elettrostatiche…). Per non parlare del numero crescente di dispositivi e macchinari che comprendono al loro interno dell'elettronica, sempre meno distanziati tra loro o delle comunicazioni wireless che crescono più dei funghi.

Agli albori della compatibilità i primi problemi si risolvevano o aumentando le distanze tra sorgenti e vittime o spostando le frequenze in bande non occupate. Oggi tutte le frequenze sono utilizzate e la densità dei dispositivi elettronici è aumentata a dismisura: pensate soltanto a quanti utenti di rete e a quanti dispositivi a batteria (a pila) ci sono in un appartamento.

I miglioramenti nei materiali e nelle conoscenze dei fenomeni (comprese le capacità di simulazione a disposizione di tutti) ci sono, ma sono molto più lenti di quelli della tecnologia prima citati. Per l'aumento della frequenza di un clock di 10 volte peggioriamo i disturbi di 100 volte ma miglioriamo la tecnologia soltanto di 1 o 2 volte!

Non dimentichiamo, inoltre, che i costi devono scendere e bisogna rassegnarsi a rinunciare alle soluzioni più sicure (come esempio schermi e filtri robusti). Soltanto la migliore progettazione può costituire la via di uscita e probabilmente nel prossimo futuro la progettazione migliore passerà sempre di più attraverso all'uso di programmi di simulazione ("field solver" o "solutori di campo") capaci di modellare parti sempre più complesse dei prodotti (contenitori, schede, cavi…).

Possiamo concludere che nei tempi a venire il lavoro allo specialista EMC non dovrebbe proprio mancare.

Comportamento non ideale dei componenti

In questo capitolo si evidenzia come i componenti passivi abbiano un comportamento che dipende dalla frequenza. A frequenze più elevate il modello teorico semplificato non rappresenta più correttamente il comportamento dei componenti e c'è bisogno di modelli più sofisticati di quelli disegnati negli schemi elettrici. Dopo i componenti C, L, R vengono esaminati i conduttori, i trasformatori, le linee e le ferriti.

Lo scostamento del comportamento reale dei componenti elettronici da quello ideale è spesso utilizzato come introduzione ai corsi di compatibilità elettromagnetica. Offre infatti esempi semplici da comprendere che chiariscono la differenza esistente tra la progettazione elettronica che non considera i requisiti EMC e la progettazione EMC vera e propria

Molti progettisti elettronici, soprattutto quelli specializzati nei circuiti logici e analogici a bassa frequenza - tra l'altro i più importanti rispettivamente per le emissioni e le suscettibilità - sono abituati a mettere insieme i componenti creando così i circuiti i cui schemi elettrici passano poi alla produzione per il montaggio sui PCB. Non si curano della omologazione EMC, salvo poi trovarsi nella condizione di non sapere che pesci prendere dopo aver fallito, fatto più che probabile con dispositivi di complessità medio-alta, le prove di compatibilità elettromagnetica.

Sappiamo che la compatibilità deve essere progettata e, mancando un progetto ad-hoc, le probabilità di conseguire un esito positivo nelle prove sono minime se non per apparati molto semplici.

Viceversa i requisiti EMC devono essere analizzati dall'inizio del progetto elettronico per poter adottare in tempo utile ed al minimo costo gli accorgimenti che consentiranno di passare le prove o, in caso di eventuale improbabile fallimento delle stesse, di applicare con cognizione di causa e senza patemi d'animo le azioni correttive necessarie.

I componenti che esamineremo sono i più semplici cioè i componenti passivi, quelli di cui, sbagliando, riteniamo di conoscere già tutto quanto serve per poterli impiegare nella progettazione.

Scostamento tra comportamento reale e ideale

Prendiamo come esempio un condensatore. Normalmente il modello adottato è quello ideale di figura 1, parte sinistra, consistente in una semplice capacità C.

Il condensatore è spesso impiegato come filtro. Se in una resistenza di carico c'è un disturbo a frequenza $f = \frac{\omega}{2\pi}$ di 20MHz, viene spontaneo mettere in parallelo un

condensatore di valore C di capacità sufficientemente alta in modo da applicare una reattanza bassa alla frequenza di interesse in parallelo alla resistenza oggetto della nostra valutazione.

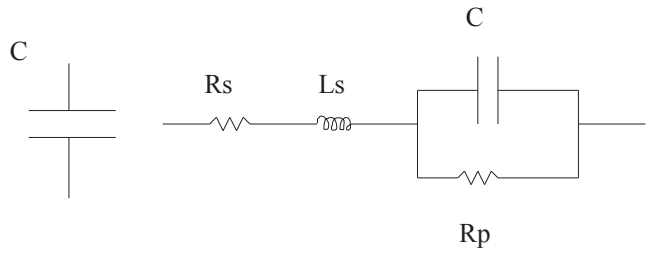

Figura 1 - Modelli di condensatore ideale e condensatore reale

Nel punto nodale P della figura 2 il disturbo si ripartisce tra il condensatore e la resistenza e quanto più bassa è la reattanza del condensatore, tanto più la corrente di disturbo è sottratta alla resistenza dalla capacità.

Prendendo fisicamente un condensatore di elevata capacità in modo da creare una condizione prossima al cortocircuito, pieghiamone i reofori e per un confronto rapido tocchiamo con essi i reofori della resistenza. Può accadere, con buone probabilità, che la riduzione del disturbo sullo schermo dello strumento di misura appaia inferiore alle aspettative o addirittura trascurabile.

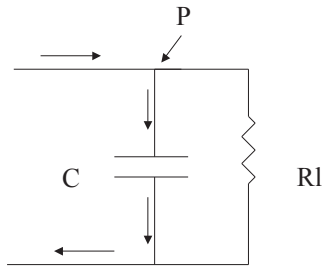

Figura 2 - Condensatore come filtro

Sommario

Prefazione *6*
La compatibilità elettromagnetica *10*

I tre capitoli dell'EMC 11
Accoppiamenti 12
Disturbi ed interferenze 13
Le prove EMC 14
Il progetto EMC 14
Le specifiche 16
Esempi di compatibilità difficile 16
Gli obblighi di legge 18
Il futuro 18

Comportamento non ideale dei componenti *20*

Scostamento tra comportamento reale e ideale 20
Il condensatore 23
Il condensatore nei filtri 25
Antirisonanza 25
L'induttore 27
Casi particolari di induttori 28
Il resistore 29
Il trasformatore 30
Piste di stampati e di cavi 31
L'impatto delle induttanze parziali 34
La linea di trasmissione 35
La ferrite 36

Massa e terra *38*

La terra 38
La massa 40
Esercizio sul percorso delle correnti di ritorno 41
Tipi di masse 43
Punto singolo 44
Limiti in frequenza dello schema a punto singolo 47
Schema misto 49
Applicazioni pratiche 50
I loop di massa 53
Interventi per spezzare i loop di massa 55
Correnti nel coassiale 56

Le equazioni di Maxwell *58*

La legge di Faraday 60
Legge di Ampère 61
Le leggi di Gauss 62
La legge di conservazione della carica 64
Esempi di soluzioni delle equazioni 66
Il vettore di Poynting 68

L'onda piana uniforme **69**

Teoria delle antenne ***76***

Il dipolo Hertziano **77**
Il dipolo magnetico **82**
Il dipolo a mezz'onda **84**
Schiera di antenne **88**
Guadagno di antenna **91**
L'antenna RX **94**
Calcolo del campo generato e della potenza ricevuta **96**
Antenna biconica **96**
Antenne a monopolo o loop attivi **98**
Antenna o loop passivo **98**
Antenna logperiodica **99**
Antenna horn **99**

Le linee di trasmissione ***100***

Il campo elettromagnetico **101**
Parametri della linea **103**
Impiego delle equazioni **105**
La potenza **110**
Linea ad un solo conduttore **111**

Teoria dei segnali ***114***

I segnali periodici **116**
I sistemi lineari **117**
Spettro di onda rettangolare **121**
Lo spettro di frequenza **123**
Le funzioni di trasferimento **123**
Il calcolo dell'inviluppo **125**
Prima regola (della combinazione) **126**
Seconda regola (della traslazione) **127**
Terza regola (dell'impulso) **127**
Quarta regola (degli impulsi traslati) **129**
Quinta regola (della derivata) **129**
Impiego delle regole **129**
Analizzatore di spettro **132**
Inviluppo dello spettro **132**
I bus digitali **135**
I segnali impulsivi **136**

La schermatura ***138***

Efficienza di schermatura **140**
Schermi di rame **144**
Schermi per campo vicino **146**
Schermi magnetici **149**
Aperture **152**
Guide d'onda **157**
Schermatura dei cavi **159**

Schermi parziali **159**
Riassunto **160**

I circuiti digitali ***162***

Generazione dei disturbi **163**
Induttanza della massa **164**
Corrente di ritorno **166**
Induttanza della linea di alimentazione **169**
Altre soluzioni **173**
Ridondanze **174**
Filtraggi **174**
Gerarchia di condensatori **174**

I circuiti stampati ***176***

Disposizione dei circuiti **176**
Le correnti di ritorno **179**
Multilayer **183**
Schede con segnali misti **186**
Integrati misti **190**
Altre tecniche di separazione **194**
Analogica di potenza **195**

Diafonia ***198***

Linea a tre fili **200**
Linea a 3 fili in regime sinusoidale **202**
Effetto delle perdite **205**
Diafonia con sorgente digitale **206**
Diafonia nel dominio del tempo **207**
Conduttori schermati **208**
Conduttori intrecciati **212**
Cavi intrecciati, coassiali e guide d'onda **216**

Emissioni condotte ***218***

Perché occorre limitare le emissioni condotte **218**
Tipi di accoppiamento **219**
L'interfaccia di rete **220**
Le curve limite delle specifiche **220**
Misure di modo comune **222**
La LISN **223**
Impostazione iniziale del progetto **224**
Correnti di modo differenziale e di modo comune **226**
Disturbi differenziali **230**
Disturbi di modo comune **236**
Progetto del filtro differenziale **241**
Progetto del filtro di modo comune **242**
Criticità dei filtri **246**
Filtri su scheda **249**
Spread spectrum **249**
Rumore dei diodi **250**

Inverter 251
Armoniche 255

Appendice alle emissioni condotte *258*

La LISN 258
I decibel 261
I Filtri 263
I diagrammi di Bode 266
Il choke di modo comune 268

Emissioni irradiate *272*

Metodologia di progetto 273
Correnti differenziali 274
Altri interventi sul campo differenziale 280
Spread spectrum 280
La ridondanza 282
Le correnti differenziali: un altro punto di vista 284
Altre sorgenti di campo magnetico 285
Correnti di modo comune 287
Calcolo del campo di modo comune 290
Interventi di contenimento 292
Schermatura 294
Collegamento tra piano di massa e contenitore 296
Contenitore e connettori a guscio non metallico 297
Sperimentazione 298
Sommario degli interventi progettuali 299

Immunità RF *300*

Immunità verso emissione 300
Sovrapposizione tra emissione ed immunità 301
Criteri di suscettibilità 303
Modalità di accoppiamento 304
Livelli progettuali di intervento 306
Il cavo 308
Il contenitore 311
La scheda 314

Appendice all'immunità RF *318*

Accoppiamenti tra antenna e linea 318
Linee bilanciate 320

Immunità ai transitori condotti *326*

Criteri di immunità 326
Prove continue e prove impulsive 327
Livelli di intervento 327
Tipi di disturbi 328
I soppressori 330
Parametri del soppressore 333

Famiglie di soppressori **333**
Il transitorio veloce **334**
Linee di rete **337**
Linee di telecomunicazione **337**
Combinazione di soppressori **338**

Le scariche elettrostatiche ***340***

Triboelettricità **341**
Carica nei conduttori **343**
La scarica **345**
Carica, tensione, capacità **346**
Human body model **348**
Suscettibilità dei componenti a ESD **349**
Prova di scariche elettrostatiche **350**
Componenti suscettibili alle scariche **352**
Accoppiamenti **354**
Interventi **354**
La pratica **355**
I cavi **356**
Interventi sul contenitore **359**
Le aperture **361**
Effetti indesiderati delle scariche ESD **364**
Contenitore non schermato **366**

Bibliografia ***370***
Sommario ***372***