



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRICA PER LA REALIZZAZIONE E LA GESTIONE DEI SISTEMI AUTOMATIZZATI

SEDE DI CALTANISSETTA

Programma del corso di COMPATIBILITÀ ELETTRICITÀ

III ANNO – II SEMESTRE – MODULI: III, IV – 6 CFU

DOCENTE: PROF. ING. GUIDO ALA - <http://www.dieet.unipa.it/ala/>

Generalità sulla compatibilità elettromagnetica (CEM). Definizioni. Terminologia. Unità di misura di comune impiego. Sistemi a parametri distribuiti. Esempi di interferenza elettromagnetica e modi di accoppiamento. Organismi normatori. Introduzione al decibel.

Sistema di misura delle lunghezze inglesi. Cenno sugli organismi FCC e CISPR. Dimensioni elettriche: lunghezza d'onda e velocità di propagazione. Guadagno in potenza, in tensione, in corrente: il decibel. Il decibel come rapporto tra grandezze; scelta del riferimento: milli- micro-. Conversione dal dB al valore effettivo. Stima delle perdite di potenza nei cavi: impiego delle relazioni di linea di trasmissione. Onde progressiva e regressiva, coefficiente di riflessione. Relazioni nel dominio fasoriale e nel dominio del tempo. Perdita di potenza secondo i costruttori, espressione in dBx. Caratterizzazione delle sorgenti di segnale. Esempi di sistemi elettricamente corti e lunghi. Esempi di conversione in dBx e viceversa. Stima di quantità espresse in dB e stima di conversioni. Esempi di calcolo di tensioni e potenze in sistemi sorgente-cavo-ricevitore.

Requisiti di compatibilità elettromagnetica per sistemi digitali. Generalità sulle norme FCC (USA) e sul documento CISPR 22. Limiti per le emissioni radiate e condotte. Esempio di LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) per la valutazione delle emissioni condotte.

Richiami di teoria dei campi elettromagnetici: equazioni di Maxwell, condizioni al contorno. Flusso di potenza, vettore di Poynting; teorema di Poynting. Onde piane uniformi in mezzi ideali senza e con perdite: equazioni nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza. Velocità di fase, impedenza intrinseca, costante di propagazione. Valutazione del flusso di potenza associato all'onda piana uniforme.

Onda piana uniforme in mezzi dielettrici ed in mezzi conduttori: valutazioni sulla costante di propagazione e sull'impedenza intrinseca. Diffusione nei buoni conduttori: solido 3D semidefinito, effetto pelle, profondità di penetrazione. Effetto pelle nel conduttore cilindrico: determinazione dell'equazione differenziale nella variabile di campo di interesse; studio nel dominio della frequenza: equazione di Bessel di prima specie e sua soluzione. Andamento del modulo della densità di corrente normalizzata in funzione della distanza radiale, al variare della frequenza. Equazioni generali delle onde dei vettori di campo.

Linee di trasmissione uniformi a due conduttori di comune impiego. Equazioni delle linee di trasmissione: modo TEM; cella elementare r, l, c, g ; determinazione dei parametri r, l, c per unità di lunghezza nel caso di due conduttori rettilinei e paralleli; parametri per un conduttore su piano di massa indefinito. Soluzione generale nel dominio del tempo.

Induttanza interna del conduttore cilindrico: espressione al variare della frequenza. Parametri p.u. del cavo coassiale e delle piste di un PCB. Soluzione delle equazioni di linea di trasmissione nel dominio del tempo: considerazioni qualitative. Soluzione nel dominio della frequenza: linea ideale; coefficiente di riflessione; computo delle quantità necessarie per la determinazione delle espressioni del fasore della tensione e del fasore della corrente in funzione di "z". Rapporto onde stazionarie (ROS) o *voltage standing wave ratio* (VSWR). Valutazione nelle diverse condizioni di carico. Flusso di potenza. Linea di trasmissione con perdite. Modelli approssimati a parametri concentrati. Cenni alla trasformazione dal dominio del tempo a quello della frequenza. Introduzione al simulatore PSPICE. Esempi di simulazione di circuiti concentrati e distribuiti.

Equazioni delle onde dei potenziali ritardati, anche in mezzo con perdite. Gauge di Lorentz. Forma generale dei potenziali ritardati nel dominio del tempo e nel dominio fasoriale, espressi come integrali di cariche e correnti. Introduzione alle antenne. Antenne a dipolo; il dipolo elettrico: impiego del potenziale vettore magnetico ritardato fasoriale per la determinazione delle espressioni generali delle componenti del campo elettrico e del campo magnetico nello spazio libero, impiegando il sistema di coordinate sferiche. Approssimazioni in campo vicino ed in campo lontano. Potenza media irradiata in funzione della distanza radiale. Potenza media totale irradiata; resistenza di radiazione. Dipolo magnetico: espressioni delle componenti di campo. Resistenza di radiazione. Impedenza d'onda del dipolo elettrico e del dipolo magnetico: andamenti in funzione del rapporto distanza radiale/lunghezza d'onda. Il dipolo lungo: dipolo in mezza onda e monopolo al quarto d'onda. Schiere di antenne. Caratterizzazione delle antenne: direttività e guadagno; apertura efficace; fattore d'antenna; effetti di bilanciamento e adattatori di impedenza. Antenne a larga banda: biconica, log-periodica.

Comportamento non ideale dei componenti: conduttori, linee e piste, il concetto di induttanza parziale. Effetto dei reofori sui componenti. Comportamento reale dei resistori: diagramma di Bode relativo al modello circuitale concentrato di un resistore reale. Comportamento reale di induttori e condensatori: diagrammi di Bode dei modelli circuitali concentrati dell'induttore e del condensatore reali. Bobine di arresto del modo comune: ferriti ed anelli di ferrite. Risposta in frequenza delle ferriti di uso comune. Elementi disturbanti nei motori in DC e nei dispositivi digitali. Comportamento reale degli interruttori elettromeccanici. Arco elettrico tra i contatti e diagramma qualitativo della caratteristica tensione-corrente: scarica di Townsend, scarica luminescente, zona di arco elettrico. Ordini di grandezza delle tensioni e delle correnti in gioco. Arco a sciame. Provvedimenti per l'eliminazione dell'arco elettrico.

Spettri dei segnali periodici: funzioni di base ortogonali ed espansione in serie di Fourier; calcolo dei coefficienti della serie in $\sin()$ e $\cos()$. Serie bilatera e monolatera con funzioni di base esponenziali complesse: relazioni tra i coefficienti.

Comportamento della funzione $\sin(x)/x$. Spettro di Fourier di un segnale periodico ad onda quadra. Tecniche di calcolo dei coefficienti della serie di Fourier per forme d'onda periodiche lineari a tratti: uso delle proprietà della "delta di Dirac". Relazione tra i coefficienti della funzione e quelli della sua derivata di ordine k . Spettro di forme d'onda trapezoidali, tipiche dei circuiti digitali. Involuppi spettrali di forme d'onda trapezoidali: effetto dei tempi di salita e discesa sul contenuto spettrale; effetto della frequenza di ripetizione e del ciclo di funzionamento; effetto delle oscillazioni smorzate. Uso degli involuppi spettrali nella valutazione delle "maschere" degli spettri di uscita di un sistema lineare.

Principio di funzionamento dell'analizzatore di spettro; rivelatore di picco e di quasi-picco. Dalla serie di Fourier alla trasformata di Fourier; integrale di convoluzione.

Modelli di emissione radiata per fili e circuiti stampati: confronto tra corrente di modo differenziale e corrente di modo comune. Modello di emissione per la corrente di modo differenziale; modello di emissione per la corrente di modo comune. Impiego della sonda di corrente per la valutazione dei livelli di emissione. Esempi applicativi dei modelli di emissione del modo differenziale e del modo comune. Modello di suscettività radiata per fili: impiego di generatori distribuiti, pilotati dal campo EM incidente. Modello di suscettività radiata semplificato per linea ideale e per linea idealizzata. Cavi coassiali e impedenza di trasferimento.

Misura delle emissioni condotte: struttura generale e impiego della LISN. Uso di filtri di alimentazione ed effetto sulle correnti di modo comune e differenziale. Circuiti equivalenti. Scomposizione delle emissioni condotte dovute alle correnti differenziali ed alle correnti di modo comune: misura delle due componenti tramite commutatore DPDT. Alimentatori dissipativi ed a commutazione: analisi qualitativa del funzionamento e delle interferenze condotte; tipologie di trasformatori, impiego e connessione a massa dello schermo tra primario e secondario. Collocazione topologica dell'alimentatore e del filtro. Cenni alla suscettività condotta.

Generalità sul problema della schermatura. Efficienza di schermatura (SE) di schermi piani: perdite per riflessione, assorbimento, riflessioni multiple. SE con sorgenti in campo lontano ed in campo vicino per incidenza normale. Cenni all'incidenza obliqua. Schermatura dei campi magnetici a bassa frequenza. Effetto delle aperture sia in alta che in bassa frequenza; principio di Babinet. Cenni all'impiego della teoria delle guide d'onda rettangolari per sagomare i fori di ventilazione.

Scariche elettrostatiche, serie triboelettrica degli elementi, effetti, tecniche di mitigazione hardware degli effetti radiati e condotti.

Collegamenti a massa: massa di segnale (analogica e digitale), massa rumorosa, terra di protezione. Collegamento a punto comune e a punti multipli, impedenza di accoppiamento di modo comune. Sistemi di messa a massa ibridi. Percorsi di massa parassiti. Massa a griglia nei PCB.

La compatibilità elettromagnetica radiata negli impianti elettrici: analisi qualitativa.

Impatto ambientale dei campi elettromagnetici: generalità sulla compatibilità elettromagnetica fisiologica con riferimento ai campi a bassa frequenza (sorgenti ELF) e ad alta frequenza (sorgenti IF/RF/MW).

Campi elettrico e magnetico di linee elettriche aeree ed in cavo (norma CEI 211-4): polarizzazione ellittica, livelli di campo elettrico e magnetico di linee con varie tipologie di configurazione. Livelli di campo magnetico di apparecchiature industriali e di uso domestico.

Metodi di misura e calcolo nel caso ELF. Metodi e tecniche di riduzione dell'induzione magnetica negli impianti elettrici. Tecniche di compensazione passiva per la schermatura di campi magnetici a frequenza industriale prodotti da linee elettriche aeree di trasmissione dell'energia. Progetti di schermatura di linee elettriche aeree. Realizzazione ed esercizio di un impianto di schermatura attiva di linea elettrica aerea.

Esposizione umana ai campi elettromagnetici a bassa frequenza. Esposizione umana ai campi elettromagnetici ad alta frequenza. Effetto biologico, effetti sanitari acuti e differiti. Grandezze dosimetriche: densità di corrente di conduzione, tasso di assorbimento specifico (SAR – *specific absorption rate*). Grandezze radiometriche. Limiti di base, livelli di riferimento. Normativa, linee guida internazionali e legislazione nazionale. Cenni sulla percezione del rischio.

Bibliografia consigliata

- C. Paul: "Compatibilità Elettromagnetica" – Edizioni Hoepli 1998.
- Dispense fornite dal docente.