

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Analisi delle principali tecniche per prove di immunità per la compatibilità elettromagnetica

LAUREANDO

Marco Andrea Naletto

Matricola 2002917

RELATORE

Prof. Tommaso Caldognetto

Università di Padova

CORRELATORE

Prof. Marco Stellini

Università di Padova

PADOVA, 15 LUGLIO 2024
ANNO ACCADEMICO
2023/2024

A chi mi è sempre rimasto vicino.

Sommario

Le apparecchiature elettroniche sono alla base di molte azioni compiute ogni giorno da ognuno di noi, che si parli di telefoni cellulari, lavatrici o pacemaker. I dispositivi devono poter coesistere con gli umani, ma soprattutto tra loro; si parla quindi di compatibilità elettromagnetica (EMC), ovvero il processo per cui le interferenze elettromagnetiche (EMI) sono contenute, in modo da garantire il corretto funzionamento di ogni apparecchio. Qui è dove la Commissione Elettrotecnica Internazionale, o IEC (*International Electrotechnical Commission*), con i suoi standard internazionali, entra in gioco: questi specificano le condizioni generali e le regole per poter raggiungere la compatibilità elettromagnetica. Negli standard, in particolare, si descrivono i metodi di misurazione per le emissioni e a queste si pongono dei limiti, si specificano i metodi di mitigazione raccomandati, e si delineano nel dettaglio le tecniche per prove di immunità, sulle quali si concentra questa tesi.

Indice

Indice Figure	xi
Indice Tabelle	xiii
Indice Acronimi	xix
1 Introduzione	1
1.1 Cenni storici	1
1.2 La serie IEC 61000	3
1.3 IEC 61000-4: Tecniche di test e di misurazione	4
2 Scarica elettrostatica (ESD)	7
2.1 IEC 61000-4-2: Generale	7
2.2 Livelli di test	8
2.3 Attrezzatura per la prova	10
2.3.1 Generatore di scariche elettrostatiche	10
2.3.2 Forma d'onda	12
2.3.3 Punte di scarica	13
2.4 Test set-up	14
3 Burst (EFT/B)	17
3.1 IEC 61000-4-4: Generale	17
3.2 Livelli di test	18
3.3 Attrezzatura per la prova	21
3.3.1 Generatore di EFT/B	21
3.3.2 Forma d'onda	23
3.3.3 Reti di accoppiamento/disaccoppiamento	25
3.3.4 Morsetto di accoppiamento capacitivo	26
3.4 Test set-up	27

INDICE

4 Surge	31
4.1 IEC 61000-4-5: Generale	31
4.2 Livelli di test	33
4.3 Attrezzatura per la prova	37
4.3.1 Generatore di onde combinate	37
4.3.2 Forme d'onda	39
4.3.3 Reti di accoppiamento / disaccoppiamento	42
4.4 Test set-up	44
5 Conclusioni	47
Bibliografia	49

Indice Figure

1.1	Foto dei partecipanti al Congresso Elettrico Internazionale di St. Louis.	1
1.2	Pagina iniziale di un test report. Si notano l'identificazione del dispositivo in prova, la data delle prove, e i test a cui è stato sottoposto. [5]	5
1.3	Riepilogo di un test report. Si possono notare le condizioni di pass ai vari test applicati al prodotto, con le dovute specifiche. [5]	6
2.1	Grafico del voltaggio in base all'umidità relativa.	9
2.2	Schema circuitale del generatore di scariche elettrostatiche.	10
2.3	Pistole per scariche elettrostatiche. A sinistra, un modello venduto da Volta. A destra, un modello venduto da Bartek. [8] [9]	11
2.4	Grafico ideale della corrente per una scarica a 4 kV.	12
2.5	Punta per scarica di contatto.	13
2.6	Punta per scarica aerea.	13
2.7	Punte di scarica commerciali. A sinistra, punte compatibili con il modello Teseq NSG 435. A destra, punte compatibili con il modello Haefely ONYX16. [10]	13
2.8	Test point per la prova ESD. [5]	14
2.9	Esempi di set-up ideali.	15
2.10	Configurazione di un test reale per un'apparecchiatura di tipo table-top. Si possono notare i piani di accoppiamento orizzontale e verticale, utilizzati per l'applicazione delle scariche indirette. [11]	16
3.1	Esempi di porte di alimentazione e di segnale di un notebook. [12]	17
3.2	Schema circuitale semplificato del generatore di EFT/B.	21
3.3	Generatore di EFT/B commerciale, prodotto da Schlöder. [13]	22

INDICE FIGURE

3.4	Forme d'onda ideali per carico di 50 Ω. A destra è possibile apprezzare il tempo di salita della forma d'onda, ottenuto ingrandendo i primi istanti dell'immagine di sinistra (rettangolo tratteggiato).	23
3.5	Impulsi concatenati.	23
3.6	Treno di impulsi, visto con una scala dei tempi dell'ordine delle centinaia di millisecondi.	24
3.7	Schema circuitale semplificato di una CDN per porte di alimentazione trifase. A sinistra, la sezione di disaccoppiamento e il collegamento alla rete, a destra, quella di accoppiamento e il collegamento all'EUT. Il burst viene iniettato dall'alto, passa per i condensatori, e arriva alle porte del dispositivo in prova.	25
3.8	Esempio di un morsetto di accoppiamento capacitivo.	26
3.9	Set-up ideale per prove di immunità ai burst.	27
3.10	Esempio ideale di un test set-up per prove svolte in laboratorio.	28
3.11	Esempio di set-up per prove di immunità ai EFT/B iniettati alle porte di alimentazione e di terra, per apparecchiature <i>floor-standing</i> , specifico per test <i>in situ</i>	28
3.12	Esempio di set-up reale per un'apparecchiatura di tipo <i>floor-standing</i> . [14]	29
3.13	Esempio di set-up reale per un'apparecchiatura di tipo <i>table-top</i> . Sulla destra si può notare il morsetto di accoppiamento capacitivo. [15]	29
4.1	Circuito semplificato del generatore di onde combinate 1,2/50 μs (8/20 μs).	37
4.2	Generatore di forme d'onda combinate di fascia alta, prodotto da TheEMCShop.[16]	38
4.3	Forma d'onda della tensione a circuito aperto.	39
4.4	Forma d'onda della corrente di cortocircuito.	40
4.5	CDN per accoppiamento capacitivo su linee a.c. e d.c., in modalità <i>line-to-line</i> . A sinistra, alimentazione e rete di disaccoppiamento. A destra, rete di accoppiamento ed EUT. Il disturbo viene iniettato dall'alto.	42

4.6	CDN per linee di interconnessione simmetriche non schermate, in modalità <i>line-to-ground</i> . A sinistra, alimentazione e rete di disaccoppiamento. A destra, rete di accoppiamento ed EUT. Il disturbo viene iniettato dall'alto.	43
4.7	Esempio di set-up ideale per surge applicati a linee schermate. Si possono notare le misure di sicurezza prese per evitare di disturbare la rete elettrica su entrambi i lati, e la lunghezza del cavo che collega AE ed EUT, che lo standard consiglia essere di 20 m. . . .	44
4.8	Esempio di set-up reale per la prova di immunità ai surge. [17] . . .	45

Indice Tabelle

2.1	Classi di installazione.	8
2.2	Livelli di test con le rispettive tensioni.	9
2.3	Parametri del generatore ESD.	11
2.4	Caratteristiche della forma d'onda di corrente.	12
3.1	Tensioni e frequenze degli impulsi da applicare all'EUT in base al livello di test.	20
3.2	Tensioni di uscita di picco e frequenze di ripetizione.	22
4.1	Livelli di test con le rispettive tensioni.	36
4.2	Riassunto delle definizioni di tempo di fronte d'onda e durata, con le relative tolleranze.	41
4.3	Relazioni tra tensioni e correnti all'uscita del CWG.	41

Indice Acronimi

IEC *International Electrotechnical Commission*, commissione elettrotecnica internazionale.

EMC *ElectroMagnetic Compatibility*, compatibilità elettromagnetica.

EMI *ElectroMagnetic Interference*, interferenze elettromagnetiche.

SI Sistema Internazionale.

CISPR *Comité international spécial des perturbations radioélectriques*, Comitato Internazionale Speciale per le Interferenze Radio.

EUT *Equipment Under Test*, dispositivo che si sottopone ai test.

ESD *ElectroStatic Discharge*, scarica elettrostatica.

AE *Auxiliary Equipment*, apparecchiatura ausiliaria.

EFT/B *Electrical Fast Transient / Burst*, transiente elettrico veloce, o burst.

CDN *Coupling / Decoupling Network*, rete di accoppiamento / disaccoppiamento.

CCC *Capacitive Coupling Clamp*, morsetto di accoppiamento capacitivo.

RGP *Reference Ground Plane*, piano di massa di riferimento.

CWG *Combination Wave Generator*, generatore di onde combinate.

1

Introduzione

1.1 CENNI STORICI

[1] L'IEC trova le sue origini nel Congresso Elettrico Internazionale di St. Louis, il 15 settembre 1904 (figura 1.1). Qua venne avanzata per la prima volta la proposta di creare un organismo internazionale di normazione. L'idea rimase tale fino al 27 giugno del 1906, quando a Londra si tenne una riunione, presieduta da A. Siemens, che portò alla nascita della Commissione Elettrotecnica Internazionale. 16 nazioni parteciparono al convegno, e fu nominato presidente dell'associazione William Thomson, meglio conosciuto come Lord Kelvin.



Figura 1.1: Foto dei partecipanti al Congresso Elettrico Internazionale di St. Louis.

Negli anni '30, l'IEC espanse il Sistema Internazionale di unità di misura (SI) con nuove grandezze, come l'*hertz* (Hz) per le frequenze e il *weber* (Wb) per il flusso magnetico. Dopo una pausa forzata causata dalla Seconda Guerra Mondiale, dal 1948 al 1980 il numero di comitati tecnici crebbe da 34 ad 80 e cominciò ad includere nuove tecnologie, come resistenze e condensatori,

1.1. CENNI STORICI

dispositivi a semiconduttore, apparecchi elettrici utilizzati in ambito medico, navigazione marittima, e sistemi ed equipaggiamenti per le comunicazioni radio.

È proprio durante la Seconda Guerra Mondiale e nel relativo dopoguerra che si cominciò a notare la necessità di regolare le interferenze elettromagnetiche (EMI), dato il numero crescente di dispositivi elettronici. Questi spesso causavano interferenze reciproche, che ne compromettevano le funzionalità. Un caso tristemente noto di interferenze elettromagnetiche che causarono enormi danni è l'incendio della portaerei USS *Forrestal* nel 1967, quando una EMI causò il lancio involontario di un razzo da parte di un aereo parcheggiato sul ponte, che colpì il serbatoio di un altro velivolo, facendone fuoriuscire il carburante e al contempo dandogli fuoco. Si innescò una reazione a catena che portò al tragico totale di 134 morti e 161 feriti.

Negli anni '70 e '80, il CISPR (Comitato Internazionale Speciale per le Interferenze Radio), nato nel 1934 e parte della IEC, pubblicò diversi standard che stabilivano i limiti per le emissioni elettromagnetiche dei dispositivi elettronici. Questi standard furono adottati da vari paesi come base per le loro normative nazionali. Nel 1989, l'Unione Europea emanò la direttiva 89/336/CEE, che stabilì per la prima volta dei requisiti di compatibilità elettromagnetica per i dispositivi elettronici all'interno del mercato europeo. Nel 1993 entrò in vigore la marcatura CE, ancora oggi necessaria per poter commerciare qualsiasi prodotto in Europa, che permette al consumatore di essere certo che il dispositivo comprato rispetti le normative europee in fatto di sicurezza, salute e ambiente, tra le quali troviamo anche gli standard per l'EMC.

Ad oggi, l'IEC conta più di diecimila Standard Internazionali che fungono da base per la gestione del rischio e della qualità, che vengono utilizzati nei test e nelle certificazioni per verificare che le promesse del produttore vengano mantenute.

1.2 LA SERIE IEC 61000

La serie IEC 61000 raggruppa tutti gli standard che trattano la compatibilità elettromagnetica. Quest'ultima si divide in due grandi categorie: sicurezza ed immunità. Per sicurezza si intende la quantità di disturbi elettromagnetici generati da un dispositivo, mentre l'immunità indica la capacità del dispositivo di tollerare tali disturbi senza compromettere il suo corretto funzionamento. Facendo un esempio pratico, la divisione canadese di Nintendo, la famosa azienda produttrice di videogiochi, nel 2004 emanò un comunicato nel quale si sconsigliava di l'utilizzo della loro console DS con la funzione wireless attiva entro 9 pollici (circa 23 cm) da un pacemaker, per evitare di causare alcun tipo di disturbo all'apparecchio salvavita. In questo caso, la console è il dispositivo che genera interferenze elettromagnetiche, e il pacemaker è il dispositivo che deve esserne immune.

La serie si compone di sei sezioni:

Parte 1: Generale, dove vengono riportate delle considerazioni generali, tra cui l'introduzione e i principi fondamentali, e le principali definizioni e terminologie.

Parte 2: Ambienti, nella quale vengono descritti e classificati i vari tipi di ambiente, e ad ognuno viene assegnato un livello di compatibilità da soddisfare.

Parte 3: Limiti, in cui si trovano i limiti di emissione e i livelli di test per le prove di immunità.

Parte 4: Tecniche di test e di misurazione, dove vengono descritte le varie modalità di test.

Parte 5: Linee guida su installazione e mitigazione. Qui si trovano consigli sulle installazioni e sui metodi e i dispositivi di mitigazione delle interferenze elettromagnetiche.

Parte 6: Standard generici. Stabiliscono i requisiti essenziali dei prodotti destinati ad un determinato ambiente, ad esempio domestico o industriale.

1.3 IEC 61000-4: TECNICHE DI TEST E DI MISURAZIONE

Il primo documento della parte 4 della serie 61000 [2] offre una visione generale su tutta la sottoserie. Dopo un'introduzione generale si trova la descrizione della classica struttura degli standard della serie 61000-4, composta da:

1. Scopo.
2. Riferimenti alle normative.
3. Termini e definizioni.
4. Generale.
5. Limiti / livelli di test.
6. Attrezzatura per la prova.
7. Set-up di test.
8. Procedura di test.
9. Valutazione dei risultati del test.
10. Test report.

Dopodiché vi è la parte dedicata alla selezione dei test da effettuare su un dispositivo: per ognuno dei 27 standard che illustrano un test, vi è una breve descrizione che indica quali dispositivi ha senso sottoporre a quella specifica prova. Ad esempio, la prova di immunità ai surge [3] è applicabile ad ogni prodotto collegato a reti che lasciano l'edificio di installazione del prodotto stesso o alla generica rete elettrica, mentre la prova di immunità ai transienti elettrici veloci [4] è applicabile ai prodotti collegati alla rete elettrica o che hanno cavi in prossimità della stessa.

Infine, vi è la parte che descrive come deve essere strutturato un test report, ovvero il documento da produrre durante le prove e una volta finite, che deve riportare tutte le informazioni necessarie a riprodurre i test, e in particolare:

- Un'identificazione del dispositivo in prova (EUT, *Equipment Under Test*), ad esempio tramite il tipo di prodotto e il numero seriale.
- Un'identificazione delle apparecchiature utilizzate per svolgere i test.

- Ogni condizione ambientale non ordinaria nella quale il test è stato svolto, come ad esempio una custodia schermata.
- Ogni condizione specifica necessaria alla riproduzione del test.
- I livelli di performance indicati dal produttore, dal cliente, o da chi commissiona i test.
- I criteri di performance indicati nello standard.
- Qualsiasi effetto notato sul dispositivo durante o dopo l'applicazione del disturbo durante il test, e la durata di questi effetti.
- La condizione di pass / fail, in base ai criteri specificati nello standard o concordati tra il produttore e il cliente.

La condizione di pass o fail è cruciale, perché determina la conformità del prodotto agli standard, influenzandone la sicurezza, la qualità, l'accettazione sul mercato e la responsabilità legale. Nelle figure 1.2 e 1.3 si possono trovare un esempio della pagina iniziale e del sommario di un test report.

1 CERTIFICATION

PRODUCT: PCI-E SAS HBA Card
BRAND: LSI
MODEL NO.: 25243 (refer to item 3.1 for more details)
APPLICANT: LSI CORP
TESTED: Mar. 09 ~ Mar. 16, 2010
TEST SAMPLE: ENGINEERING SAMPLE
STANDARD: EN 55022:2010 +AC:2011, Class B
 EN 61000-3-2:2006 +A1:2009 +A2:2009, Class D
 EN 61000-3-3:2008
 EN 55024:2010
 IEC 61000-4-2:2008 ED. 2.0 / EN 61000-4-2:2009
 IEC 61000-4-3:2010 ED. 3.2 / EN 61000-4-3:2006 +A1:2008 +A2:2010
 IEC 61000-4-4:2012 ED.3.0 / EN 61000-4-4:2004 +A1:2010
 IEC 61000-4-5:2005 ED. 2.0 / EN 61000-4-5:2006
 IEC 61000-4-6:2008 ED. 3.0 / EN 61000-4-6:2009
 IEC 61000-4-8:2009 ED. 2.0 / EN 61000-4-8:2010
 IEC 61000-4-11:2004 ED. 2.0 / EN 61000-4-11:2004

Figura 1.2: Pagina iniziale di un test report. Si notano l'identificazione del dispositivo in prova, la data delle prove, e i test a cui è stato sottoposto. [5]

1.3. IEC 61000-4: TECNICHE DI TEST E DI MISURAZIONE

IMMUNITY (EN 55024:2010)				
Standard	Test Type	Result	Remarks	Tested By
IEC 61000-4-2:2008 ED. 2.0 / EN 61000-4-2:2009	Electrostatic discharge immunity test	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Andy Chang <i>Andy Chang</i>
IEC 61000-4-3:2010 ED. 3.2 / EN 61000-4-3:2006 +A1:2008 +A2:2010	Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Brian Hsieh <i>Brian Hsieh</i>
IEC 61000-4-4:2012 ED.3.0 / EN 61000-4-4:2004 +A1:2010	Electrical fast transient / burst immunity test	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Match Tsui <i>Match Tsui</i>
IEC 61000-4-5:2005 ED. 2.0 / EN 61000-4-5:2006	Surge immunity test	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Match Tsui <i>Match Tsui</i>
IEC 61000-4-6:2008 ED. 3.0 / EN 61000-4-6:2009	Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Skys Huang <i>Skys Huang</i>
IEC 61000-4-8:2009 ED. 2.0 / EN 61000-4-8:2010	Power frequency magnetic field immunity test.	PASS	Meets the requirements of Performance Criterion A	Match Tsui <i>Match Tsui</i>
IEC 61000-4-11:2004 ED. 2.0 / EN 61000-4-11:2004	Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests	PASS	Meets the requirements of Voltage Dips: 1. >95% reduction - Performance Criterion A 2. 30% reduction - Performance Criterion A Voltage Interruptions: 1. >95% reduction - Performance Criterion C	Match Tsui <i>Match Tsui</i>

Figura 1.3: Riepilogo di un test report. Si possono notare le condizioni di pass ai vari test applicati al prodotto, con le dovute specifiche. [5]



Scarica elettrostatica (ESD)

2.1 IEC 61000-4-2: GENERALE

Secondo quanto riportato dallo standard IEC 60050-161:2014 [6], una scarica elettrostatica è "Il trasferimento di carica elettrica tra corpi a diverso potenziale elettrico in prossimità o grazie a contatto diretto"; accade spesso nella vita di tutti i giorni, per esempio quando si tocca la portiera dell'auto e si percepisce una piccola scossa. Queste scariche devono essere di almeno 3000 V per essere percepite dal corpo umano, mentre per bruciare un componente di un semiconduttore possono bastare anche solo 30 V.

Lo standard IEC 61000-4-2 [7] si riferisce a tutti i sistemi, sottosistemi ed apparecchiature che possono essere soggetti a scariche elettrostatiche per motivi legati a condizioni ambientali o alla loro installazione, quali l'uso di tappeti non conduttivi, una bassa umidità relativa, o ancora l'impiego di indumenti in PVC (vinile), condizioni che possono realizzarsi ovunque.

Le scariche elettrostatiche vengono divise in due macrocategorie: aeree o di contatto. Queste ultime vengono ulteriormente divise in scariche dirette, applicate alle superfici conduttive dell'EUT, e scariche indirette, che vengono applicate a dei piani di accoppiamento in prossimità dell'EUT.

2.2 LIVELLI DI TEST

La generazione di cariche elettrostatiche viene favorita dalla combinazione di tessuti sintetici e bassa umidità. Esistono molti modi in cui una persona si può caricare elettrostaticamente: una situazione comune è quella di camminare su un tappeto, dove ad ogni passo si trasferiscono elettroni dal corpo al tessuto, o viceversa. Un altro esempio può essere lo sfregamento tra i vestiti di una persona e la sedia dove questa è seduta.

Le attrezzature possono essere soggette a scariche elettrostatiche di svariati kilovolt, in base al tipo di tessuto indossato dalla persona e all'umidità relativa; la figura 2.1 rende molto chiari questi aspetti.

Esistono pertanto diversi livelli di test, che vanno accuratamente scelti in base alla classe ambientale e di installazione del prodotto. Tali classi sono definite in tabella 2.1.

Classe	Umidità relativa a partire da %	Materiale antistatico	Materiale sintetico	Voltaggio massimo kV
1	35	×		2
2	10	×		4
3	50		×	8
4	10		×	15

Tabella 2.1: Classi di installazione.

Ad ogni classe ambientale e di installazione corrisponde un livello di test per la scarica elettrostatica, ovvero il valore del picco di tensione al quale verrà sottoposto l'EUT durante la prova. I livelli di test sono descritti nella tabella 2.2. Le scariche aeree devono essere utilizzate solamente nel caso in cui non si possa applicare una scarica di contatto, che è la metodologia di test preferibile. Nel caso si debba utilizzare la metodologia con scariche aeree, è importante sottoporre l'EUT a tutti i livelli di test, partendo dal primo fino ad arrivare al livello specificato nel test report. Per quanto riguarda le prove compiute attraverso scariche di contatto, è sufficiente applicare il livello di test specificato nel test report, a meno che non sia esplicitamente richiesto diversamente.

CAPITOLO 2. SCARICA ELETTROSTATICA (ESD)

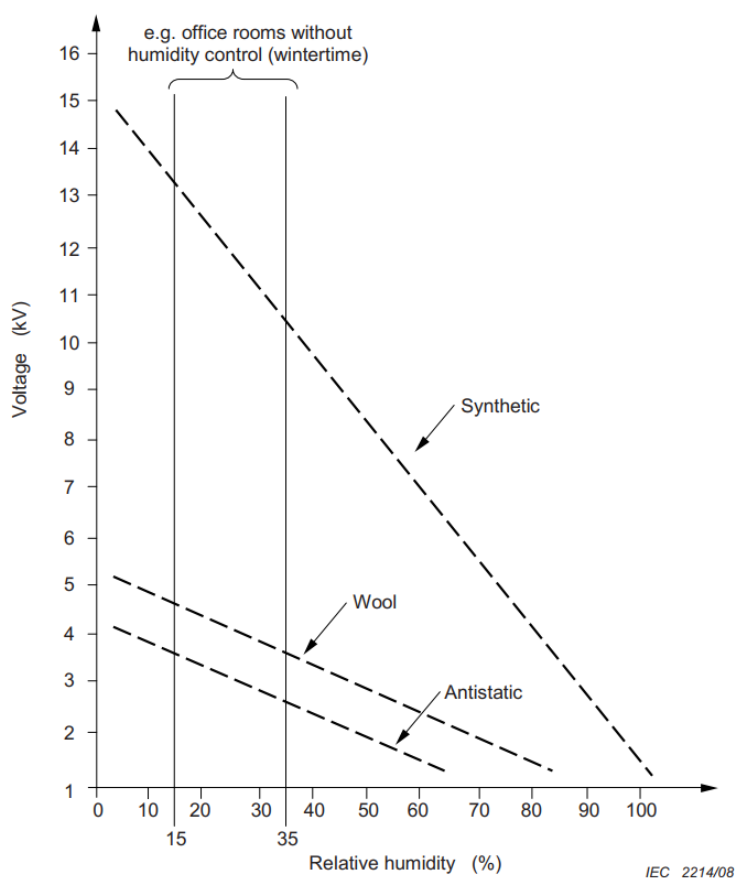


Figura 2.1: Grafico del voltaggio in base all'umidità relativa.

Livello	Tensione di test	
	Scarica di contatto (kV)	Scarica aerea (kV)
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
x ^a	speciale	speciale

^a "x" può essere qualsiasi livello, maggiore, minore o compreso tra gli altri.
Il livello deve essere definito nelle specifiche del prodotto.

Tabella 2.2: Livelli di test con le rispettive tensioni.

2.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

2.3 ATTREZZATURA PER LA PROVA

2.3.1 GENERATORE DI SCARICHE ELETTROSTATICHE

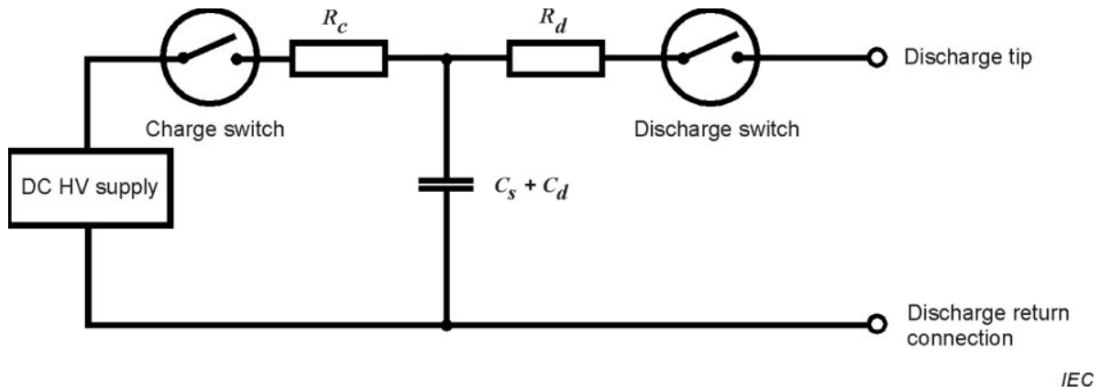


Figura 2.2: Schema circuitale del generatore di scariche elettrostatiche.

La figura 2.2 mostra il diagramma semplificato del generatore di scariche elettrostatiche, i cui elementi principali, a prescindere da dettagli realizzativi quali forma, peso o materiali, sono:

- R_c : resistenza di carica.
- C_s : condensatore per immagazzinare energia.
- C_d : capacità distribuita.
- R_d : resistenza di scarica.
- Interruttori di carica e di scarica.
- Cavo di ritorno per la scarica.
- Punte intercambiabili per la scarica (vedi figure 2.5 e 2.6).

C_d è una capacità distribuita che esiste tra il generatore e l'ambiente circostante. $C_s + C_d$ ha un valore tipico di 150 pF. R_d ha un valore tipico di 330 Ω . Il generatore di scariche elettrostatiche deve rispettare i parametri descritti in tabella 2.3.

Parametri	Valori
Tensione di uscita, scarica di contatto (vedi NOTA 1)	Almeno 2 kV fino a 8 kV, nominale
Tensione di uscita, scarica aerea (vedi NOTA 1)	Almeno 2 kV fino a 15 kV, nominale (vedi NOTA 2)
Tolleranza della tensione di uscita	$\pm 5\%$
Polarità della tensione di uscita	Positiva e negativa
Tempo di hold	≥ 5 s
Modalità di scarica	Scariche singole (vedi NOTA 3)

NOTA 1: Tensione di circuito aperto misurata alla punta di scarica del generatore di ESD.

NOTA 2: Non è necessario usare un generatore con compatibilità fino a 15 kV per scariche aeree, se la massima tensione di test usata è più bassa.

NOTA 3: Il generatore deve essere in grado di generare ad un tasso di ripetizione di almeno 20 scariche al secondo per scopi esplorativi.

Tabella 2.3: Parametri del generatore ESD.

In figura 2.3 si possono trovare degli esempi reali di generatori di scariche elettrostatiche, chiamati anche "pistole per scariche elettrostatiche" (*ESD guns*), data la loro forma.



Figura 2.3: Pistole per scariche elettrostatiche. A sinistra, un modello venduto da Volta. A destra, un modello venduto da Bartek. [8] [9]

2.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

2.3.2 FORMA D'ONDA

Il generatore deve emettere una scarica con forma d'onda quanto più simile possibile alla figura 2.4, secondo i parametri indicati in tabella 2.4.

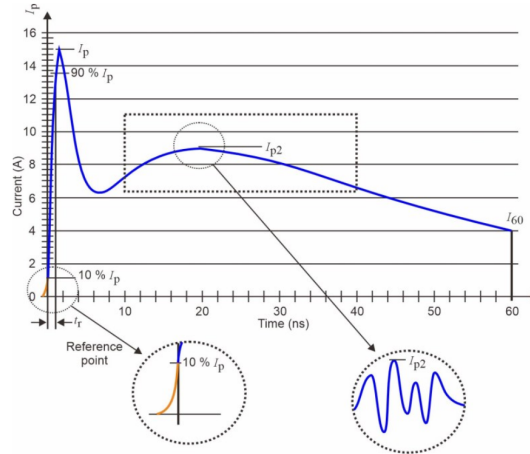


Figura 2.4: Grafico ideale della corrente per una scarica a 4 kV.

Livello		Tensione indicata	Primo picco di corrente I_p ($\pm 15\%$)	Tempo di salita t_r (vedi NOTA 1) ($\pm 25\%$)	Secondo picco di corrente I_{p2} (vedi NOTA 2) ($\pm 30\%$)	Corrente a 60 ns ($\pm 30\%$)
CD	AD	kV	A	ns	A	A
1	1	2	7.5	0.8	4.5	2.0
2	2	4	15.0	0.8	9.0	4.0
3	—	6	22.5	0.8	13.5	6.0
4	3	8	30.0	0.8	18.0	8.0
—	4	15	56.3	0.8	33.8	15.0

Il punto di riferimento per misurare il tempo per la corrente a 60 ns è l'istante in cui la corrente raggiunge per la prima volta il 10% del primo picco della corrente di scarica.

NOTA 1: il tempo di salita, t_r , è l'intervallo di tempo tra il 10% e il 90% del valore del primo picco di corrente.

NOTA 2: è il massimo di corrente che si verifica nell'intervallo di tempo da 10 ns a 40 ns dal punto di riferimento.

Tabella 2.4: Caratteristiche della forma d'onda di corrente.

2.3.3 PUNTE DI SCARICA

Le punte per scariche di contatto e per scariche aeree devono essere costruite rispettivamente secondo le figure 2.5 e 2.6. Le punte possono essere ricoperte con un rivestimento isolante, purché siano soddisfatte le specifiche per la scarica di corrente. In figura 2.7: immagini di punte di scarica commerciali.

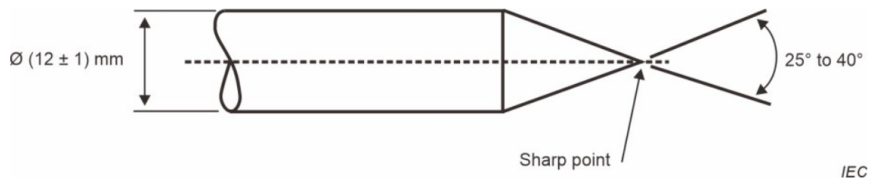


Figura 2.5: Punta per scarica di contatto.

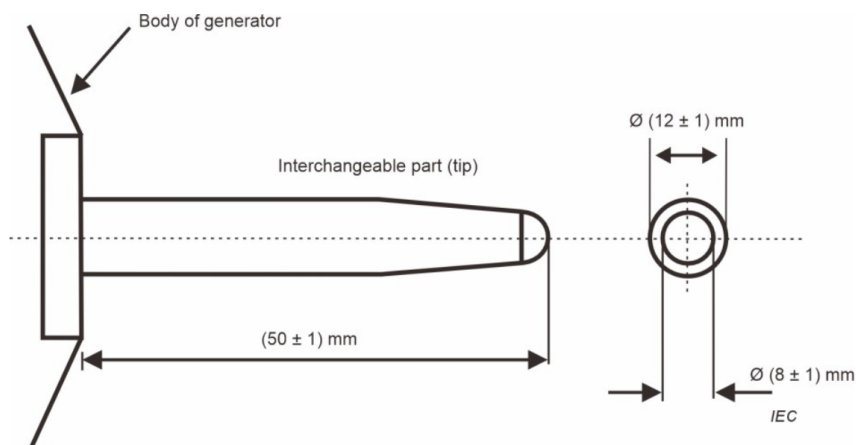


Figura 2.6: Punta per scarica aerea.



Figura 2.7: Punte di scarica commerciali. A sinistra, punte compatibili con il modello Teseq NSG 435. A destra, punte compatibili con il modello Haefely ONYX16. [10]

2.4 TEST SET-UP

Il set-up di test si compone del generatore di scariche elettrostatiche, dell'EUT e dell'apparecchiatura ausiliaria (AE) necessaria ad applicare scariche dirette e indirette all'EUT nella seguente maniera:

- Scariche di contatto sulle superfici conduttive e sui piani di accoppiamento.
- Scariche aeree sulle superfici non conduttive.

I punti dove vengono applicate le scariche sono detti punti di test (*test point*). Alcuni esempi di questi possono essere trovati nelle immagini di figura 2.8, dove i punti indicati con i numeri 1, 5 e 6 sono punti sottoposti a scarica di contatto, mentre quelli indicati con il numero 7 sono punti sottoposti a scarica aerea.

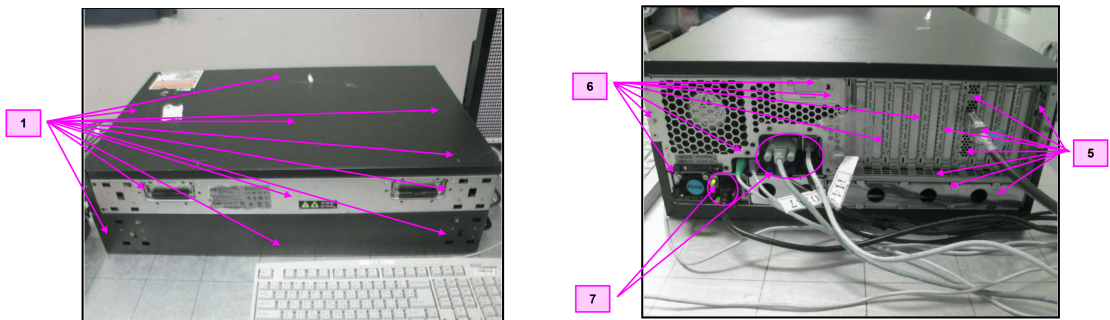


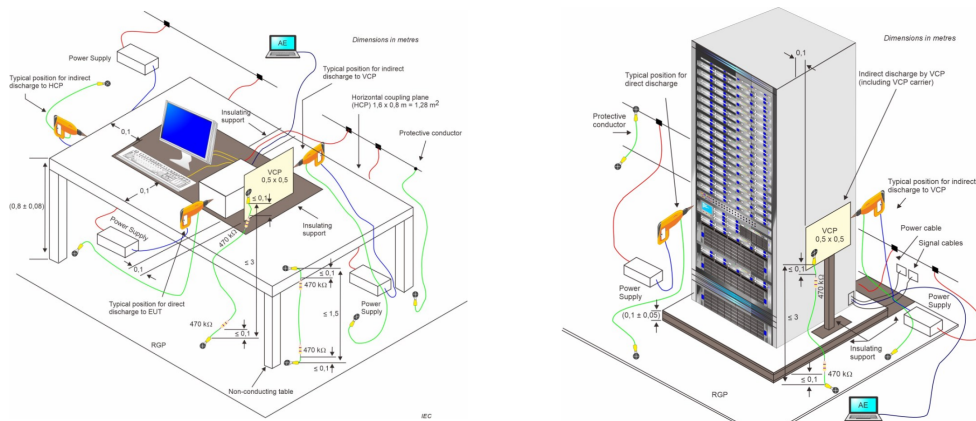
Figura 2.8: Test point per la prova ESD. [5]

Lo standard propone due diversi set-up, uno per attrezzature che possono essere messe sopra un tavolo isolato (*table-top equipment*), ed uno per apparecchiature da posizionare sul pavimento (*floor-standing equipment*). Alcuni esempi di questi set-up sono mostrati nelle figure 2.9a e 2.9b. In figura 2.10, invece, si trova un set-up reale.

Durante i test, particolare attenzione va rivolta alle apparecchiature non collegate a terra, come possono essere un telefono cellulare, un laptop, o qualsiasi altro oggetto elettronico portatile, in quanto si corre il rischio che l'EUT non riesca a scaricarsi. Se la carica non viene rimossa manualmente prima dell'arrivo di una nuova scarica elettrostatica, è possibile che parte o l'intero EUT venga stressato con una tensione fino al doppio di quella richiesta.

In questi casi il set-up generale rimane lo stesso, ma viene aggiunto un cavo con resistenze dette "di spurgo" da 470 k Ω , simili a quelle usate nei piani di accoppiamento verticale e orizzontale. Nonostante questo sia il metodo preferibile,

CAPITOLO 2. SCARICA ELETTROSTATICA (ESD)



(a) Configurazione per apparecchi di tipo table-top.

(b) Configurazione per apparecchi di tipo floor-standing.

Figura 2.9: Esempi di set-up ideali.

la presenza del cavo potrebbe alterare i risultati dei test. Come alternativa lo standard propone due soluzioni distinte:

1. Estendere l'intervallo di tempo tra scariche successive fino ad arrivare al naturale tempo di decadimento della carica dall'EUT.
2. Spazzolare l'EUT con una spazzola di fibra di carbonio collegata a terra con delle resistenze di spurgo (per esempio, due da 470 k Ω) nel cavo di messa a terra.

Come precedentemente detto nella sezione 2.2, le scariche elettrostatiche aeree sono favorite da ambienti secchi. Per questo motivo, nello standard viene specificato che i test ESD per scariche aeree vadano eseguiti in un ambiente con umidità relativa minore del 30%. Se l'EUT non dovesse passare il test in queste condizioni, allora si può ripetere il test rimanendo entro queste condizioni:

- Temperatura ambientale: tra i 15°C e i 35°C.
- Umidità relativa: tra il 30% e il 60%.
- Pressione atmosferica: tra gli 86 kPa (860 mbar) e i 106 kPa (1060 mbar).

2.4. TEST SET-UP

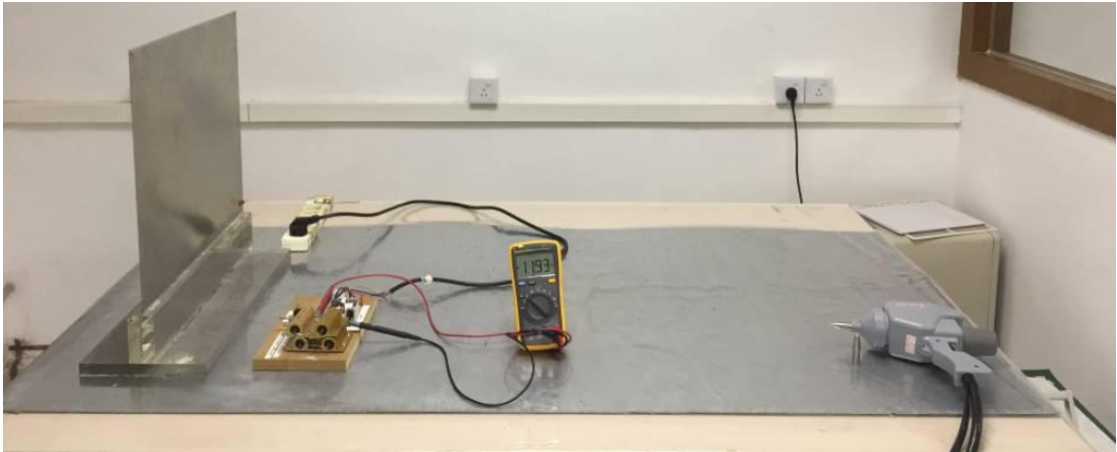


Figura 2.10: Configurazione di un test reale per un'apparecchiatura di tipo table-top. Si possono notare i piani di accoppiamento orizzontale e verticale, utilizzati per l'applicazione delle scariche indirette. [11]

3

Burst (EFT/B)

3.1 IEC 61000-4-4: GENERALE

Secondo quanto riportato dallo standard IEC 60050-161:2014 [6], un transiente elettrico veloce, o più semplicemente detto burst (EFT/B), è "Una sequenza di un numero limitato di impulsi distinti, o un'oscillazione di durata limitata". I burst vengono generati da operazioni di commutazione, quali per esempio l'interruzione di carichi induttivi, o il rimbalzo del contatto di un relè.

Lo standard IEC 61000-4-4 [4] definisce i parametri guida per effettuare i test di immunità ai burst. La prova si compone di un grande numero di impulsi iniettati alle porte di controllo, di alimentazione, di segnale e di terra dell'EUT. Sono significativi la grande ampiezza, il breve tempo di salita, l'alta frequenza di ripetizione e la bassa energia dei transienti.

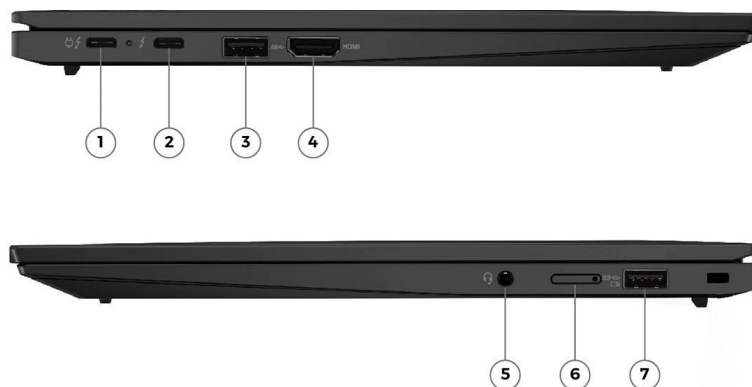


Figura 3.1: Esempi di porte di alimentazione e di segnale di un notebook. [12]

3.2 LIVELLI DI TEST

Lo standard propone quattro diverse classi ambientali e di installazione, necessarie per stabilire un livello di performance adeguato all'ambiente nel quale l'EUT andrà ad operare, a cui corrispondono altrettanti livelli di test. Queste sono:

Classe 1: Ambiente ben protetto. Peculiari di questo tipo di applicazione sono:

- Soppressione di tutti gli EFT/B nei circuiti di alimentazione e di controllo.
- Separazione tra linee di alimentazione (a.c. e d.c.) e circuiti di controllo e misura provenienti da altri ambienti appartenenti a livelli di severità più elevata.
- Cavi di alimentazione schermati, con entrambe le estremità della schermatura messe a terra sul piano di riferimento dell'installazione, e protezione dall'alimentazione tramite filtraggio.

Una stanza computer può rappresentare questo tipo di ambiente.

Classe 2: Ambiente protetto. Viene caratterizzato da:

- Soppressione parziale degli EFT/B nei circuiti di alimentazione e di controllo, che vengono fatti commutare solo tramite relè (non da contattori).
- Separazione non ottimale tra i circuiti appartenenti all'ambiente industriale e altri provenienti da ambienti appartenenti a livelli di severità più elevata.
- Separazione fisica tra cavi di alimentazione e di controllo non schermati e cavi di segnale o di comunicazione.

Una stanza di controllo per impianti industriali o elettrici può rappresentare questo tipo di ambiente.

Classe 3: Tipico ambiente industriale. È contraddistinto da:

- Nessuna soppressione degli EFT/B nei circuiti di alimentazione e di controllo, che vengono fatti commutare solamente da relè (non da contattori).

- Separazione non ottimale tra i circuiti appartenenti all'ambiente industriale e altri provenienti da ambienti appartenenti a livelli di severità più elevata.
- Cavi dedicati per linee di alimentazione, controllo, segnale e comunicazioni, ma separati tra loro in modo non ottimale.
- Disponibilità del sistema di messa a terra grazie a tubi conduttivi, conduttori di terra nelle passerelle portacavi e ad una maglia di terra.

Un'area dove risiedono apparecchiature industriali può rappresentare questo tipo di ambiente.

Classe 4: Ambiente industriale gravoso. Questo tipo di ambiente presenta:

- Nessuna soppressione degli EFT/B nei circuiti di alimentazione e di controllo, che vengono fatti commutare da relè e contattori.
- Nessuna separazione tra i circuiti appartenenti all'ambiente industriale e altri provenienti da ambienti a livelli di severità più elevata.
- Nessuna separazione tra linee di alimentazione, controllo, segnale e comunicazioni.
- Uso di cavi multi-core in comune per linee di controllo e di segnale.

L'area esterna appartenente ad apparecchiature industriali, dove non è stata adottata nessuna pratica di installazione specifica, può rappresentare questo tipo di ambiente.

Come menzionato in precedenza, ad ogni classe di installazione corrisponde un livello di test. Questi vengono descritti in tabella 3.1. L'impiego della frequenza di 5 kHz è tradizionale, mentre i 100 kHz si avvicinano più alla realtà. Il singolo produttore determina quale frequenza sia meglio utilizzare durante le prove.

3.2. LIVELLI DI TEST

Tensione di test e frequenza di ripetizione degli impulsi				
Livello	Porte di alimentazione¹ e di terra (PE)		Porte di segnale e di controllo	
	Tensione di picco kV	Frequenza di ripetizione kHz	Tensione di picco kV	Frequenza di ripetizione kHz
1	0.5	5, 100	0.25	5, 100
2	1	5, 100	0.5	5, 100
3	2	5, 100	1	5, 100
4	4	5, 100	2	5, 100
x ²	speciale	speciale	speciale	speciale

¹ Per porte di alimentazione si intendono sia a.c. che d.c.

² "x" può essere qualsiasi livello, maggiore, minore o compreso tra gli altri. Il livello deve essere definito nelle specifiche del prodotto.

Tabella 3.1: Tensioni e frequenze degli impulsi da applicare all'EUT in base al livello di test.

3.3 ATTREZZATURA PER LA PROVA

3.3.1 GENERATORE DI EFT/B

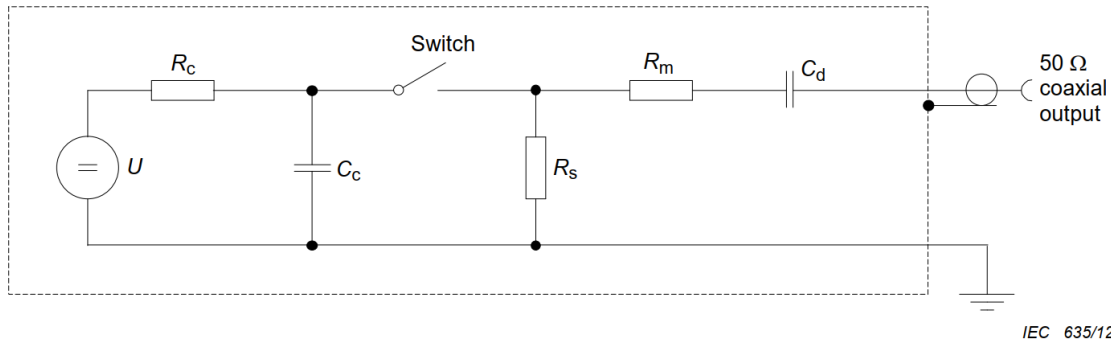


Figura 3.2: Schema circuitale semplificato del generatore di EFT/B.

La figura 3.2 mostra il diagramma semplificato del generatore di burst, i cui elementi principali, a prescindere da dettagli realizzativi quali forma, peso o materiali, sono:

- U : fonte di alta tensione.
- R_c : resistenza di carica.
- C_c : condensatore per immagazzinare energia.
- R_s : resistenza responsabile della durata dell'impulso.
- R_m : resistenza per l'adattamento di impedenza.
- C_d : condensatore per bloccare le componenti dc.
- Interruttore per alta tensione.

Per poter essere utilizzato durante le prove, il generatore deve rispettare varie caratteristiche:

Range di tensione in uscita con carico di 50 Ω : da almeno 0.125 kV, fino ad arrivare a 2 kV.

Range di tensione in uscita con carico di 1000 Ω : da almeno 0.24 kV, fino ad arrivare a 3.8 kV.

Polarità: sia positiva che negativa.

Tipo di output: coassiale, 50 Ω .

3.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

Frequenza di ripetizione: secondo la tabella 3.2, $\pm 20\%$.

Relazione con la rete elettrica a corrente alternata: asincrona.

Tensione impostata kV	V _{picco} (circuito aperto) kV	V _{picco} (1000 Ω) kV	V _{picco} (50 Ω) kV	Frequenza di ripetizione kHz
0.25	0.25	0.24	0.125	5, 100
0.5	0.5	0.48	0.25	5, 100
1	1	0.95	0.5	5, 100
2	2	1.9	1	5, 100
4	4	3.8	2	5, 100

Tabella 3.2: Tensioni di uscita di picco e frequenze di ripetizione.

La figura 3.3 mostra un generatore di EFT/B commerciale di fascia alta.



Figura 3.3: Generatore di EFT/B commerciale, prodotto da Schlöder. [13]

3.3.2 FORMA D'ONDA

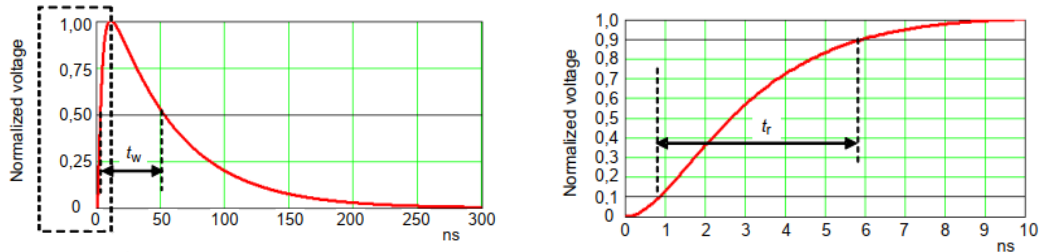


Figura 3.4: Forme d'onda ideali per carico di 50 Ω . A destra è possibile apprezzare il tempo di salita della forma d'onda, ottenuto ingrandendo i primi istanti dell'immagine di sinistra (rettangolo tratteggiato).

La forma d'onda generata deve avere un aspetto quanto più simile possibile a quello della figura 3.4, rimanendo nelle tolleranze concesse. Questa andrà a concatenarsi con forma d'onda successive, come mostrato in figura 3.5. La forma finale del treno di impulsi sarà quindi simile alla figura 3.6.

Così come per il generatore, anche la forma d'onda da esso generata deve rispettare alcune caratteristiche chiave:

Durata del burst: (vedi figura 3.6)

- (15 ± 3) ms a 5 kHz.
- (0.75 ± 0.15) ms a 100 kHz.

Periodo del burst: (300 ± 60) ms (vedi figura 3.6).

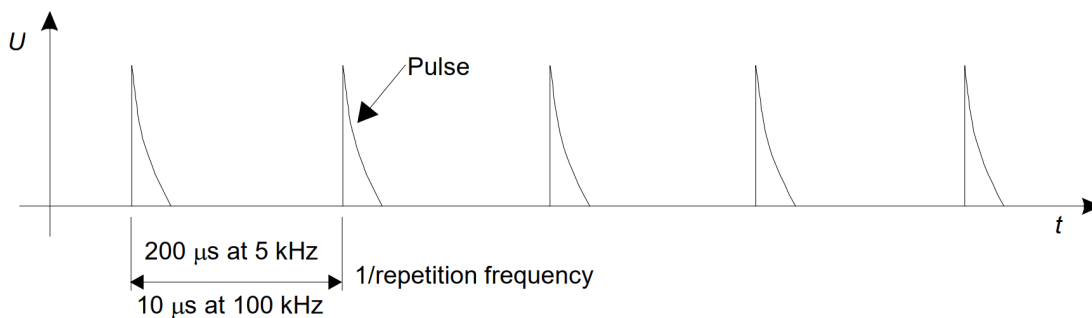


Figura 3.5: Impulsi concatenati.

3.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

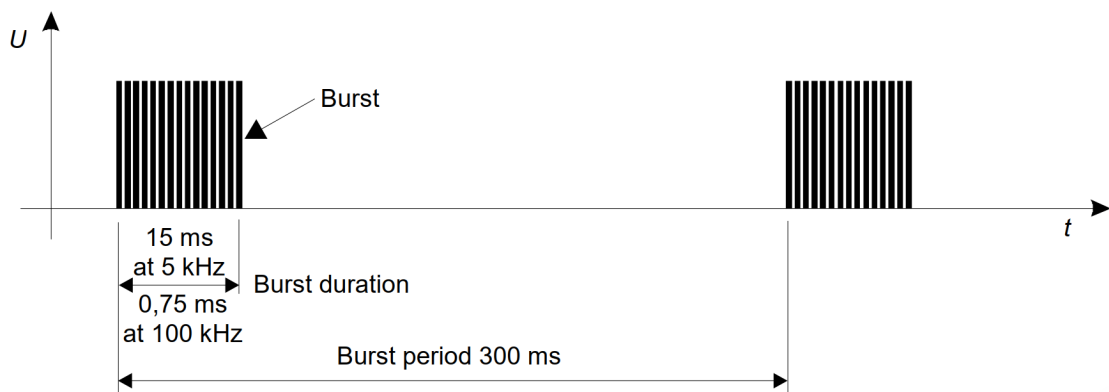


Figura 3.6: Treno di impulsi, visto con una scala dei tempi dell'ordine delle centinaia di millisecondi.

Caratteristiche del singolo impulso: (si differenziano in base al carico adottato)

- Carico da 50 Ω :
 - * Tempo di salita $t_r = (5 \pm 1.5)$ ns.
 - * Larghezza di impulso $t_w = (50 \pm 15)$ ns.
 - * Tensione di picco = secondo la tabella 3.2, $\pm 10\%$ (vedi figura 3.4).
- Carico da 1000 Ω :
 - * Tempo di salita $t_r = (5 \pm 1.5)$ ns.
 - * Larghezza di impulso $t_w = 50$ ns, con una tolleranza di -15 ns fino a +100 ns.
 - * Tensione di picco = secondo la tabella 3.2, $\pm 20\%$.

3.3.3 RETI DI ACCOPPIAMENTO/DISACCOPIAMENTO

Si chiama rete di accoppiamento/disaccoppiamento (CDN, *coupling / decoupling network*) lo strumento che permette al treno di impulsi creato dal generatore di venire iniettato nel dispositivo in prova senza subire variazioni considerevoli, proteggendo al contempo la rete elettrica dallo stesso segnale. L'utilizzo di CDN è necessario per due principali motivi; il primo è che, senza di essa, si dovrebbe cambiare il cavo di uscita del segnale del generatore ogni qualvolta si volesse cambiare tipo di porta da testare. Il secondo motivo, più importante, è da trovarsi nella sezione di disaccoppiamento: non ci si può permettere che i segnali generati vadano a disturbare la rete elettrica locale, alla quale l'EUT deve essere collegato durante la fase di test.

Esistono svariati tipi di CDN, ognuna con il proprio scopo: in figura 3.7 possiamo trovare lo schema circuitale di una CDN per porte di alimentazione trifase, con quindi tre accessi per le fasi, uno per il neutro e uno per la terra, ma esistono anche CDN per sistemi monofase, per porte differenti di controllo o di segnale, e così via.

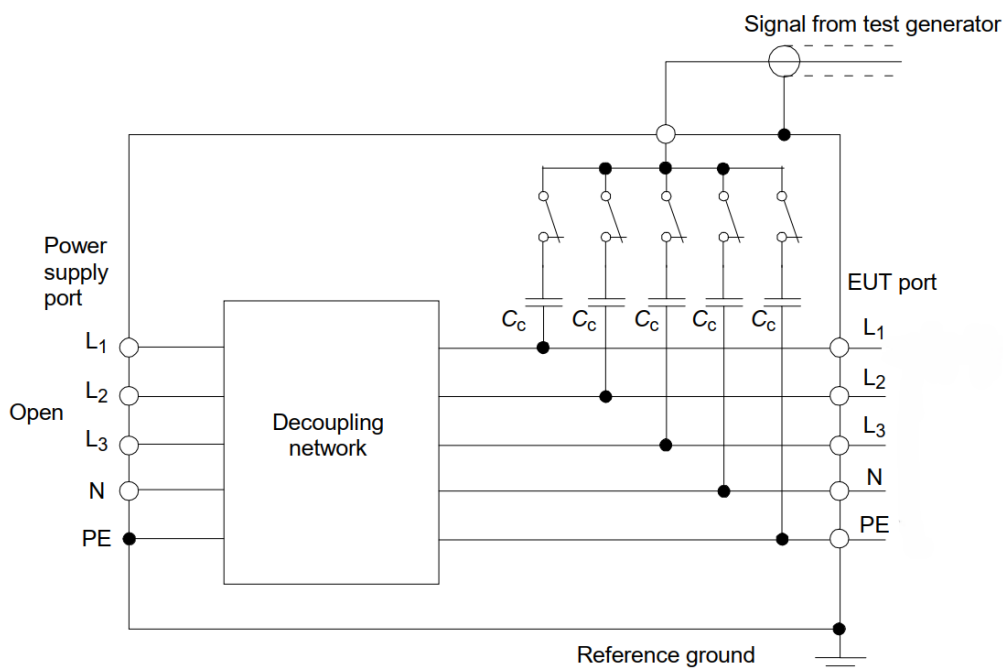


Figura 3.7: Schema circuitale semplificato di una CDN per porte di alimentazione trifase. A sinistra, la sezione di disaccoppiamento e il collegamento alla rete, a destra, quella di accoppiamento e il collegamento all'EUT. Il burst viene iniettato dall'alto, passa per i condensatori, e arriva alle porte del dispositivo in prova.

3.3.4 MORSETTO DI ACCOPPIAMENTO CAPACITIVO

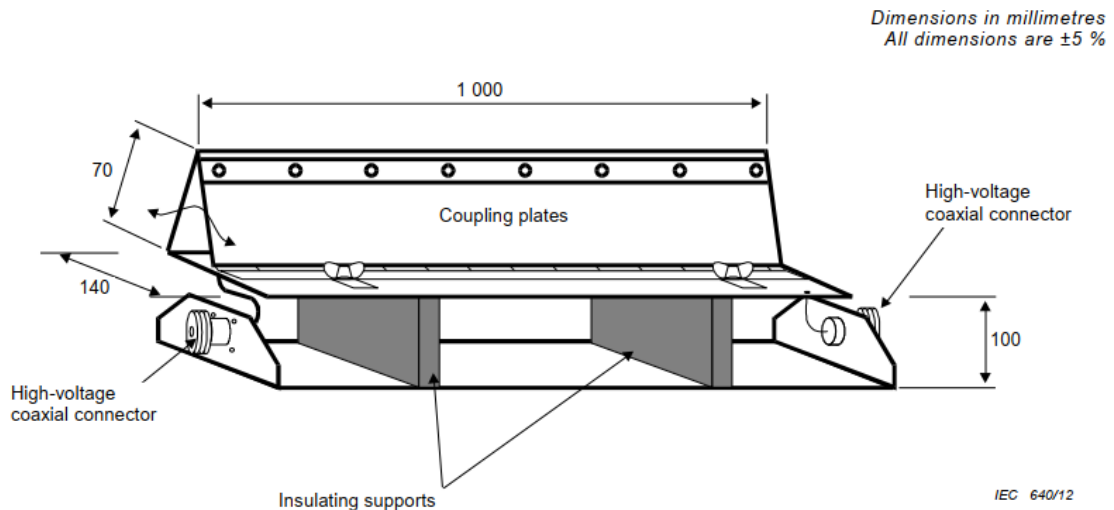


Figura 3.8: Esempio di un morsetto di accoppiamento capacitivo.

Il morsetto di accoppiamento capacitivo (CCC, *Capacitive Coupling Clamp*) è un tipo di rete di accoppiamento che consente di iniettare il disturbo ad un cavo collegato all'EUT, senza quindi alcuna connessione galvanica ai terminali delle porte dello stesso, alla schermatura dei cavi o a qualsiasi altra parte del dispositivo in prova. È molto utile perché la CCC viene posizionata intorno ai cavi già connessi all'EUT, permettendo così il passaggio del treno di impulsi tramite accoppiamento capacitivo. Questo rende il processo di test più efficiente e riduce il rischio di danneggiare le apparecchiature o i cavi collegandoli e scollegandoli continuamente.

Il morsetto, oltre a dover essere chiuso il più possibile durante i test per ottenere la massima capacità di accoppiamento, deve rispettare alcune caratteristiche, oltre a quelle già descritte in figura 3.8. In particolare, deve essere posizionato su un piano di massa (RGP, *Reference Ground Plane*), che deve estendersi per almeno 10 cm oltre alla CCC su ogni lato.

3.4 TEST SET-UP

Il set-up di test si compone del generatore di EFT/B, di un dispositivo di accoppiamento (morsetto oppure CDN), di un dispositivo di disaccoppiamento, e di un piano di massa di riferimento, ad esempio un tavolo di materiale conduttivo, come mostrato in figura 3.9.

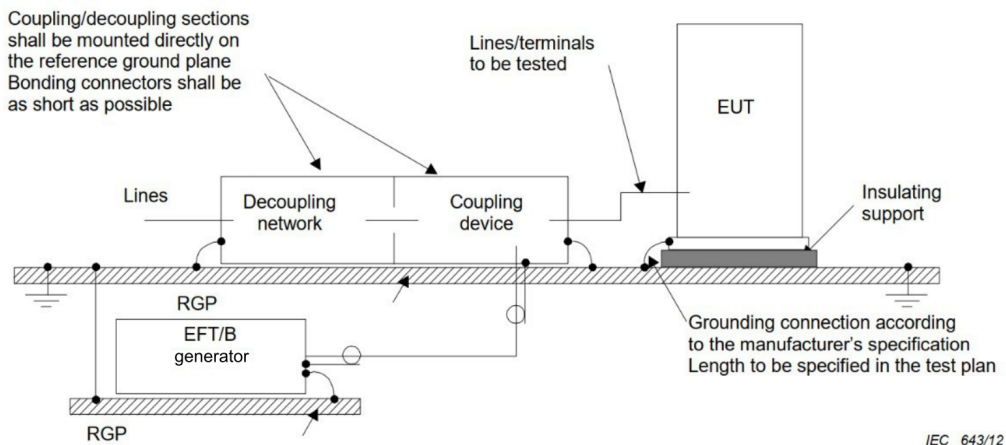


Figura 3.9: Set-up ideale per prove di immunità ai burst.

Le linee guida generali su come disporre strumentazione ed EUT, sia di tipo *table-top*, sia di tipo *floor-standing*, si possono trovare in figura 3.10. Questa immagine copre solamente prove svolte in laboratorio e non in esterna, i cosiddetti *test in situ*, per i quali si può trovare un esempio nella figura 3.11.

Nella pratica si cerca di seguire quanto più possibile il set-up ideale. In figura 3.12 è possibile vedere una foto di come si realizza la prova con una CDN generica, mentre in figura 3.13 si può apprezzare un morsetto di accoppiamento capacitivo.

È obbligatorio testare i dispositivi con entrambe le polarità del generatore di EFT/B per il tempo necessario a sollecitare il dispositivo in esame, e in ogni caso il test non deve durare meno di un minuto. Inoltre, per tutti i test svolti, le condizioni climatiche ed elettromagnetiche devono essere tali da consentire il corretto funzionamento del dispositivo in esame e da non influenzare i risultati dei vari test.



Figura 3.12: Esempio di set-up reale per un'apparecchiatura di tipo floor-standing. [14]



Figura 3.13: Esempio di set-up reale per un'apparecchiatura di tipo table-top. Sulla destra si può notare il morsetto di accoppiamento capacitivo. [15]

4

Surge

4.1 IEC 61000-4-5: GENERALE

Secondo quanto riportato dallo standard IEC 60050-161:2014 [6], un surge è "Un transiente di corrente, tensione o potenza che si propaga lungo una linea o un circuito, caratterizzato da una rapida ascesa seguita da una più lenta discesa". I surge possono essere generati da commutazioni di potenza, o da fulmini.

Lo standard IEC 61000-4-5 [3] definisce un riferimento comune per valutare l'immunità di dispositivi elettrici ed elettronici quando soggetti a dei surge.

Generalmente, i surge vengono suddivisi in due macrocategorie:

Transitori di commutazione dei sistemi di alimentazione, che possono essere separati in:

- Importanti disturbi di commutazione del sistema di alimentazione, come ad esempio il cambiamento di stato di banchi di condensatori.
- Piccole attività di commutazione locale, o variazioni di carico nel sistema di distribuzione dell'energia.
- Circuiti risonanti nei dispositivi di commutazione, dovuti a transistori o tiristori.
- Vari guasti di sistema, come cortocircuiti o archi elettrici verso l'impianto di terra del sistema.

Transitori dovuti a fulmini. Questi possono produrre dei surge in diverse maniere, le principali sono:

4.1. IEC 61000-4-5: GENERALE

- Il fulmine colpisce direttamente un dispositivo esterno, iniettando correnti elevate che, scorrendo attraverso la resistenza di massa o nell'impedenza del circuito, producono alte tensioni.
- Il fulmine colpisce indirettamente (ad esempio una scarica tra nuvole, oppure colpisce oggetti vicini), generando campi elettromagnetici che inducono tensioni e/o correnti nei conduttori esterni e/o all'interno di un edificio.
- Il flusso di corrente di un fulmine che deriva da scariche a terra nelle vicinanze si accoppia nei percorsi di massa comuni del sistema di messa a terra dell'impianto.

I surge sono i disturbi più pericolosi tra quelli descritti in questa tesi, data la loro quantità di energia e di potenza. Un'ascesa rapida e una più lenta discesa significano un tempo molto prolungato (si parla di circa 320 μ s) durante il quale le correnti possono arrivare a toccare le decine di kiloAmpere, nel caso dei fulmini.

4.2 LIVELLI DI TEST

La scelta del livello di test adeguato deve essere fatta in base alle condizioni di installazione. Lo standard propone diverse classi ambientali e di installazione:

Classe 0: ambiente elettrico ben protetto, spesso in una stanza dedicata. Si caratterizza per:

- Presenza di protezioni da sovratensioni (primarie e secondarie) per ogni cavo.
- Apparecchiature elettroniche interconnesse da un sistema di messa a terra ben progettato, che non è influenzato da fulmini o dall'alimentazione elettrica.
- Linee di alimentazione dedicate per le apparecchiature elettroniche.
- Tensione dei surge non superiore ai 25 V.

Classe 1: ambiente elettrico parzialmente protetto. È contraddistinto da:

- Presenza di protezioni da sovratensioni (primarie) per ogni cavo.
- Apparecchiature elettroniche interconnesse da una rete di messa a terra, che non è influenzato da fulmini o dall'alimentazione elettrica.
- L'alimentazione delle apparecchiature elettroniche è completamente separata dal resto dei dispositivi.
- Possono essere presenti tensioni di interferenza generate da operazioni di commutazione.
- Tensione dei surge non superiore ai 500 V.

Classe 2: ambiente elettrico dove ogni cavo è ben separato dagli altri, anche su brevi tratti. Particolari di questa classe sono:

- L'installazione è messa a terra tramite una connessione separata al sistema di terra dell'impianto elettrico. Questa connessione può essere soggetta a tensioni di interferenza generate dall'installazione stessa o da fulmini.
- L'alimentazione delle apparecchiature elettroniche è separata dagli altri circuiti, solitamente tramite un trasformatore dedicato per l'alimentazione di rete.

4.2. LIVELLI DI TEST

- Presenza di circuiti non protetti nell'installazione, ma ben separati e in numero contenuto.
- Tensione dei surge non superiore ad 1 kV.

Classe 3: ambiente elettrico dove i cavi di alimentazione e di segnale scorrono in parallelo.

- L'installazione è messa a terra tramite il sistema di messa a terra comune dell'impianto, che può essere soggetto a tensioni di interferenza generate dall'installazione stessa o da fulmini.
- Correnti dovute a scariche verso terra, operazioni di commutazione o fulmini possono generare tensioni di interferenza con ampiezze relativamente elevate nel sistema di terra.
- Apparecchiature elettroniche protette e altri dispositivi meno sensibili sono collegati allo stesso sistema di alimentazione.
- I cavi di interconnessione possono essere in parte all'esterno, ma vicini alla rete di terra.
- Sono presenti carichi induttivi non soppressi, e solitamente non vi è separazione tra cavi di diverso impiego.
- Tensione dei surge non superiore ai 2 kV.

Classe 4: ambiente elettrico dove le interconnessioni scorrono all'esterno insieme ai cavi di alimentazione, e gli stessi cavi sono usati per circuiti elettrici ed elettronici.

- L'installazione è messa a terra tramite il sistema di messa a terra dell'impianto, che può essere soggetto a tensioni di interferenza generate dall'installazione stessa o da fulmini.
- Correnti dell'ordine dei kA dovute a scariche verso terra, operazioni di commutazione o fulmini possono generare tensioni di interferenza con ampiezze relativamente elevate nel sistema di terra.
- La rete di alimentazione può essere la stessa per apparecchiature elettriche ed elettroniche.
- I cavi di interconnessione scorrono all'esterno, anche per apparecchiature ad alta tensione.
- Tensione dei surge non superiore ai 4 kV.

Classe 5: ambiente elettrico per apparecchiature elettroniche collegate a cavi di telecomunicazione e linee elettriche aeree in un'area non densamente popolata.

- Ogni linea o cavo è protetto da sovratensioni (primarie).
- Al di fuori delle apparecchiature elettroniche non è presente un sistema di messa a terra (impianto esposto).
- Le tensioni di interferenza dovute a scariche verso terra (correnti fino a 10 kA) e fulmini (correnti fino a 100 kA) possono essere estremamente elevate.

Classe x: condizioni speciali indicate nelle specifiche di prodotto.

In tabella 4.1 si possono notare le tensioni relative ad ogni classe di installazione. Come si può notare, le classi 0 e 5 non sono presenti, per due motivi distinti: i dispositivi appartenenti alla classe 0 non hanno bisogno di essere testati, data l'elevata sicurezza dell'ambiente dove si andranno ad installare. La classe 5, invece, è talmente ampia che utilizzare un livello comune per tutti i dispositivi che ne fanno parte sarebbe quantomeno riduttivo. Si utilizza quindi livello "x", specificato dal produttore.

Le prove *line-to-line*, nei sistemi a più fasi, si svolgono ponendo l'uscita di massa del generatore di surge su una linea a fase differente rispetto a quella da testare. Nei sistemi monofase si indica con *line-to-line* la prova svolta utilizzando come cavi di riferimento quelli di fase e neutro. Le prove *line-to-ground*, tra linea e terra, invece, sono da effettuarsi tra fase, o neutro, e terra.

4.2. LIVELLI DI TEST

Livello	Tensione di circuito aperto kV	
	<i>Line-to-line</i>	<i>Line-to-ground</i> ¹
1	—	0.5
2	0.5	1
3	1	2
4	2	4
x ²	speciale	speciale

¹ Per linee di interconnessione simmetriche il test può essere applicato a più linee simultaneamente rispetto alla massa.

² "x" può essere qualsiasi livello, maggiore, minore o compreso tra gli altri. Il livello deve essere definito nelle specifiche del prodotto.

Tabella 4.1: Livelli di test con le rispettive tensioni.

4.3 ATTREZZATURA PER LA PROVA

4.3.1 GENERATORE DI ONDE COMBinate

Nello standard vengono specificati due tipi di generatore di onde combinate (CWG, *Combination Wave Generator*). Il generatore $10/700 \mu\text{s}$ ($5/320 \mu\text{s}$) viene utilizzato per testare porte di linee di comunicazione simmetriche da esterno destinate a interconnettere sistemi ampiamente dispersi, o in generale cavi più lunghi di 300 m. Il CWG $1,2/50 \mu\text{s}$ ($8/20 \mu\text{s}$) è utilizzato in ogni altro caso. Essendo il più utilizzato, questa tesi prenderà in considerazione solamente quest'ultimo generatore.

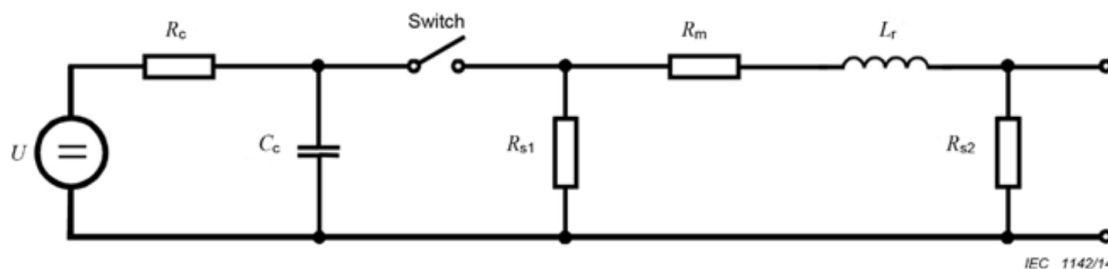


Figura 4.1: Circuito semplificato del generatore di onde combinate $1,2/50 \mu\text{s}$ ($8/20 \mu\text{s}$).

Il generatore è da costruire secondo lo schema mostrato in figura 4.1. Gli elementi principali, a prescindere da dettagli realizzativi quali forma, peso o materiali, sono:

- U : fonte di alta tensione.
- R_c : resistenza di carica.
- C_c : condensatore per immagazzinare energia.
- R_s : resistenze responsabile della durata dell'impulso.
- R_m : resistenza per l'adattamento di impedenza.
- L_r : induttanza responsabile del tempo di salita dell'impulso.
- Interruttore per alta tensione.

Per poter essere utilizzato durante le prove, il CWG deve rispettare queste caratteristiche:

Polarità: positiva e negativa.

4.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

Sfasamento: in un intervallo da 0° a 360° relativi alla fase della linea alternata che alimenta l'EUT, con una tolleranza del 10%.

Frequenza di ripetizione: 1 al minuto, o più rapida.

Tensione di picco a circuito aperto: selezionabile da 0.5 kV al livello di test richiesto.

La figura 4.2 mostra un CWG commerciale dotato di touch-screen.



Figura 4.2: Generatore di forme d'onda combinate di fascia alta, prodotto da TheEMCShop.[16]

4.3.2 FORME D'ONDA

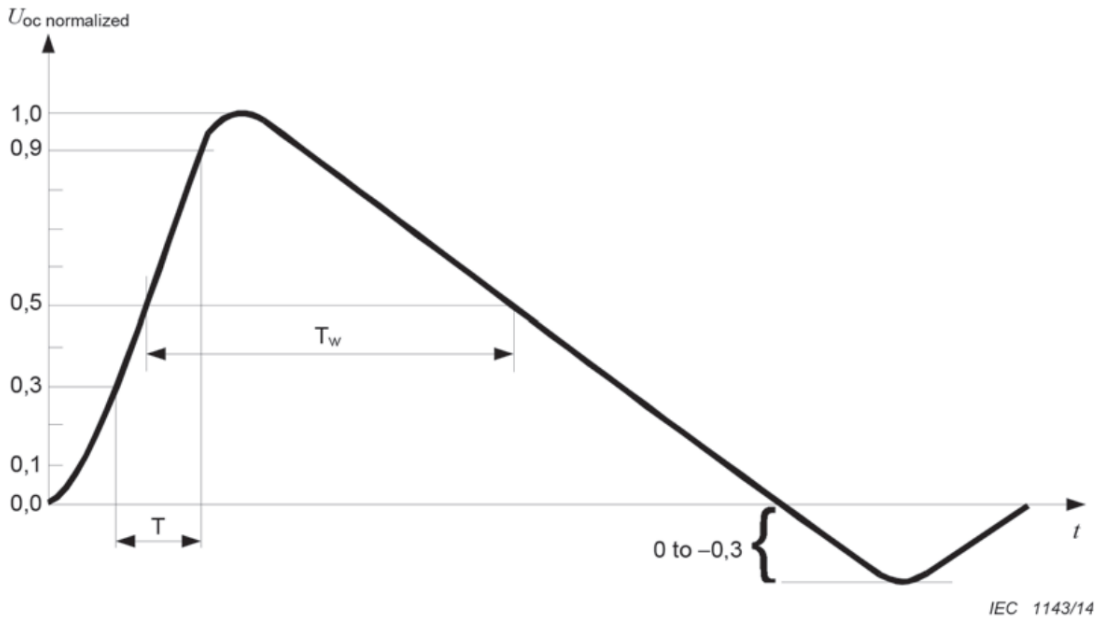


Figura 4.3: Forma d'onda della tensione a circuito aperto.

Per la prova di immunità ai surge, le forme d'onda indicate sono due (figure 4.3 e 4.4), ovvero la tensione a circuito aperto e la corrente di cortocircuito. Da qui il nome del generatore di onde combinate.

Le forme d'onda sono definite da parametri chiamati allo stesso modo, ma definiti in modo diverso per tensione e corrente. Questi sono:

Tempo di fronte d'onda (front time), T_f :

- Per la **tensione**: parametro definito come 1.67 volte l'intervallo di tempo T tra gli istanti in cui l'impulso è pari al 30% e al 90% del valore di picco.
- Per la **corrente**: parametro definito come 1.25 volte l'intervallo di tempo T_r tra gli istanti in cui l'impulso è pari al 10% e al 90% del valore di picco.

Durata, T_d :

- Per la **tensione**: intervallo di tempo tra gli istanti in cui l'impulso sale al 50% del valore di picco e scende al 50% del valore di picco (T_w).

4.3. ATTREZZATURA PER LA PROVA

- Per la **corrente**: parametro definito come 1.18 volte l'intervallo di tempo T_r tra gli istanti in cui in cui l'impulso sale al 50% del valore di picco e scende al 50% del valore di picco (T_w).

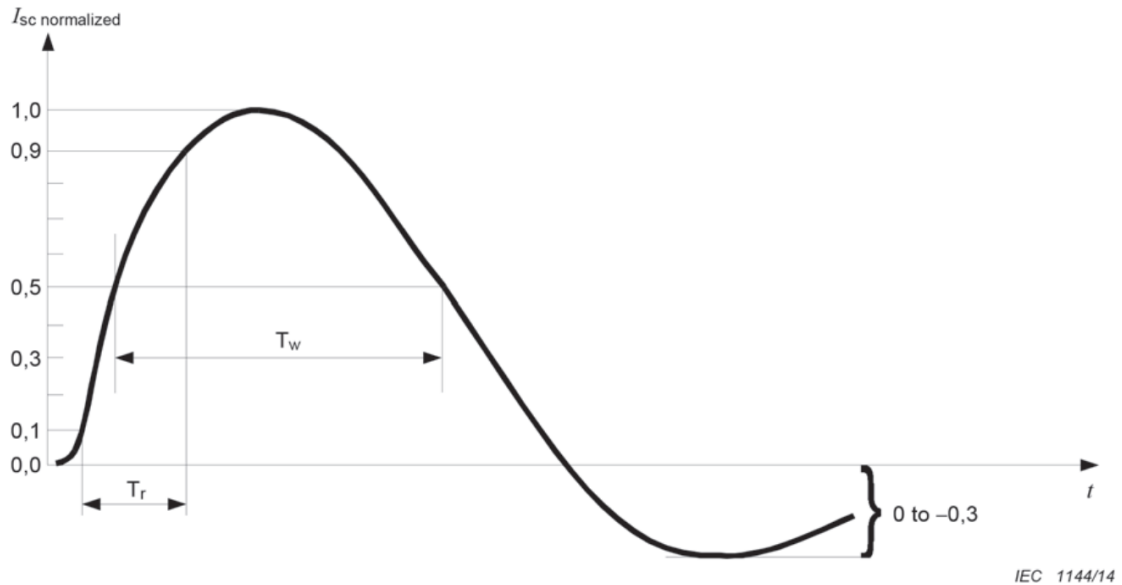


Figura 4.4: Forma d'onda della corrente di cortocircuito.

In tabella 4.2 si può trovare uno schema delle definizioni dei diversi parametri, con le relative tolleranze. A prima vista, queste definizioni sono complesse e macchinose, ma sono in realtà costruite in modo da sfruttare al meglio le caratteristiche delle diverse forme d'onda. La salita dell'onda di corrente è meno rettilinea di quella di tensione, e utilizzare il tempo T (preso tra il 30% e il 90%) per entrambe farebbe perdere precisione al risultato finale.

I numeri da moltiplicare alla durata degli intervalli non sono casuali, ma hanno lo scopo rendere più facile il confronto tra i parametri delle due forme d'onda. Nel *front time*, i numeri 1.67 e 1.25 sono il reciproco della differenza tra i valori di soglia scelti. Prendendo come esempio la tensione, il valore di T è preso tra il 30% e il 90% del valore di picco; togliendo la notazione percentuale, tra lo 0.3 e lo 0.9 del valore di picco. Questi sono i due valori di soglia. Non rimane altro che svolgere la semplice espressione

$$(0.9 - 0.3)^{-1} = (0.6)^{-1} = 1.67$$

ed ecco trovato il valore 1.67. Lo stesso vale per il valore 1.25 della corrente di cortocircuito. Il valore 1.18 per la durata della corrente di cortocircuito, invece,

proviene da dati sperimentali.

	Tempo di fronte d'onda T_f μs	Durata T_d μs
Tensione a circuito aperto	$T_f = 1.67 \times T = 1.2 \pm 30\%$	$T_d = T_w = 50 \pm 20\%$
Corrente di cortocircuito	$T_f = 1.25 \times T_r = 8 \pm 20\%$	$T_d = 1.18 \times T_w = 20 \pm 20\%$

Tabella 4.2: Riassunto delle definizioni di tempo di fronte d'onda e durata, con le relative tolleranze.

Entrambe le forme d'onda sono da prendere all'uscita del generatore senza reti di accoppiamento / disaccoppiamento collegate. Le specifiche per l'*undershoot* indicate nelle figure 4.3 e 4.4 vanno applicate solamente all'uscita del generatore. Non ci sono limitazioni sugli *overshoot* o sugli *undershoot* all'uscita delle CDN.

In tabella 4.3 si trovano le relazioni tra i picchi di tensione di circuito aperto e quelli di corrente di cortocircuito.

Picco di tensione a circuito aperto $\pm 10\%$ all' uscita del generatore	Picco di corrente di cortocircuito $\pm 10\%$ all' uscita del generatore
kV	kA
0.5	0.25
1.0	0.5
2.0	1.0
4.0	2.0

Tabella 4.3: Relazioni tra tensioni e correnti all'uscita del CWG.

4.3.3 RETI DI ACCOPPIAMENTO / DISACCOPIAMENTO

Come già visto nell'omonima sezione nel capitolo dedicato alla prova IEC 61000-4-4, la rete di accoppiamento / disaccoppiamento è un dispositivo che permette al disturbo di venire iniettato nello strumento in prova, proteggendo al contempo la rete elettrica dal disturbo stesso.

Per la prova di immunità ai surge le CDN sono importanti quanto numerose, e la loro scelta dipende da molti fattori, tra i quali:

- Il tipo di porta da testare, in particolare se di alimentazione o altro.
- Il tipo di accoppiamento applicato, se *line-to-line* o *line-to-ground*.
- Il numero di fasi dell'alimentazione dell'EUT, se trifase o monofase.
- La presenza o meno di schermature nel cavo da testare, e addirittura il tipo di schermatura utilizzata.
- Tipo di linea da testare, se simmetrica o meno.

Nelle figure 4.5 e 4.6 si possono trovare alcuni esempi di schemi circuitali di CDN.

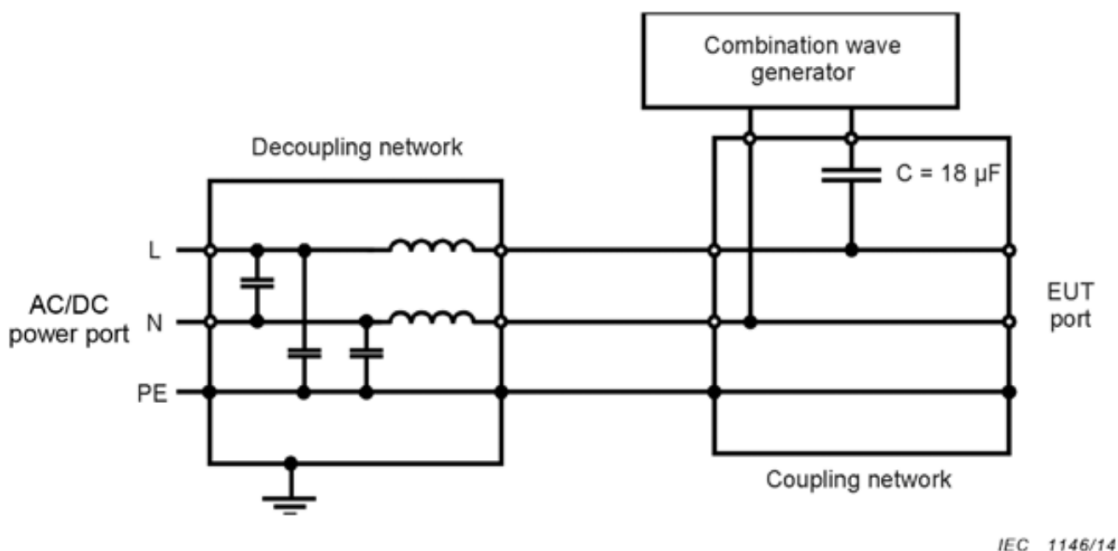


Figura 4.5: CDN per accoppiamento capacitivo su linee a.c. e d.c., in modalità line-to-line. A sinistra, alimentazione e rete di disaccoppiamento. A destra, rete di accoppiamento ed EUT. Il disturbo viene iniettato dall'alto.

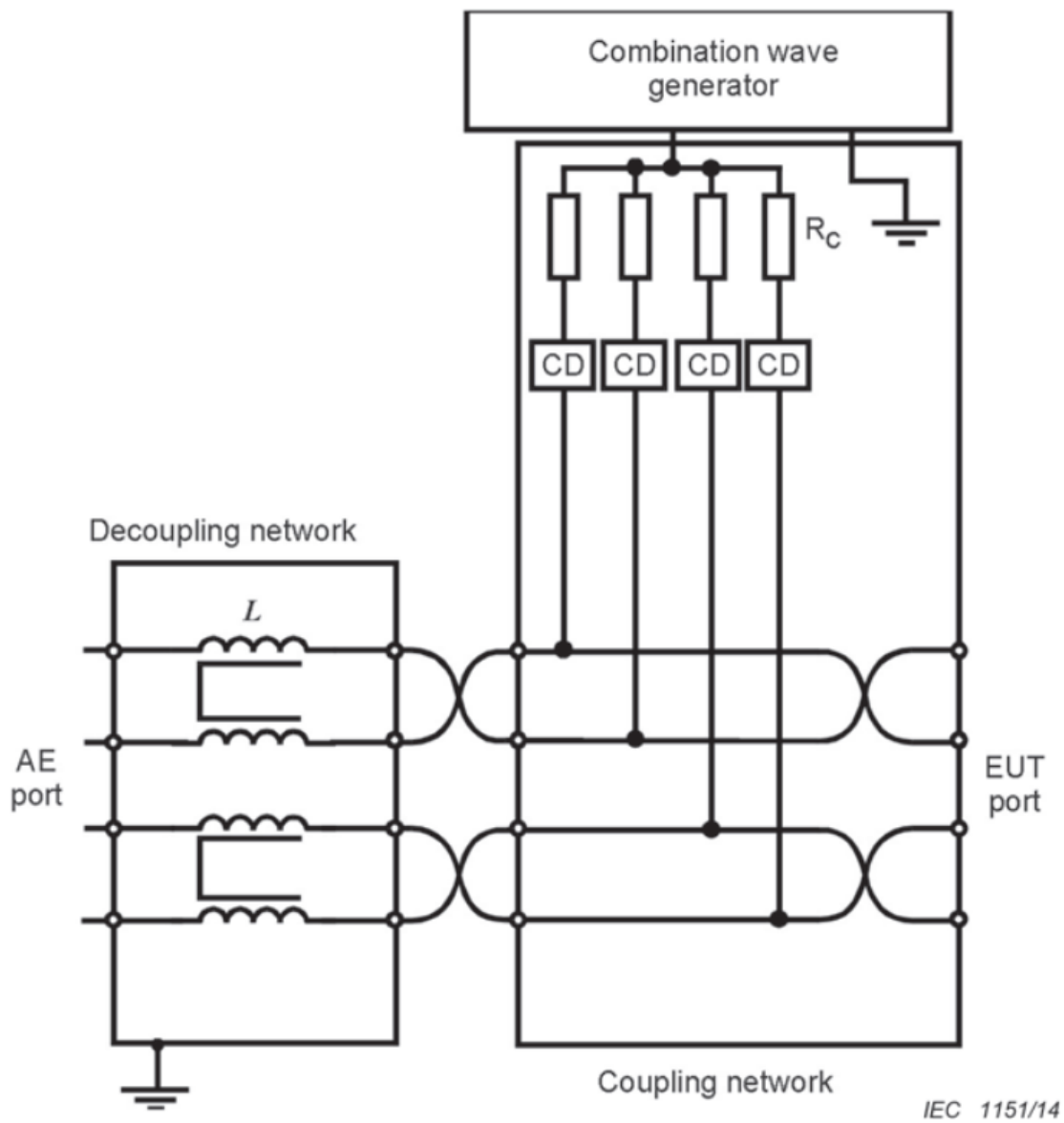


Figura 4.6: CDN per linee di interconnessione simmetriche non schermate, in modalit  line-to-ground. A sinistra, alimentazione e rete di disaccoppiamento. A destra, rete di accoppiamento ed EUT. Il disturbo viene iniettato dall'alto.

4.4 TEST SET-UP

Il set-up di test si compone di: dispositivo in prova, generatore di onde combinate, reti di accoppiamento / disaccoppiamento, attrezzature ausiliarie (se necessarie), cavi (di tipo e lunghezza specifici) e di un piano di massa di riferimento, che può essere un tavolo di materiale conduttivo.

Essendo le prove di immunità ai surge estremamente diverse tra loro in fatto di attrezzature utilizzate, sono diversi anche i set-up. Esiste infatti un set-up specifico per surge applicati a:

- Porte di alimentazione dell'EUT.
- Linee di interconnessione asimmetriche non schermate.
- Linee di interconnessione simmetriche non schermate.
- Linee schermate.

In figura 4.7 si trova un set-up ideale per surge applicati a linee schermate.

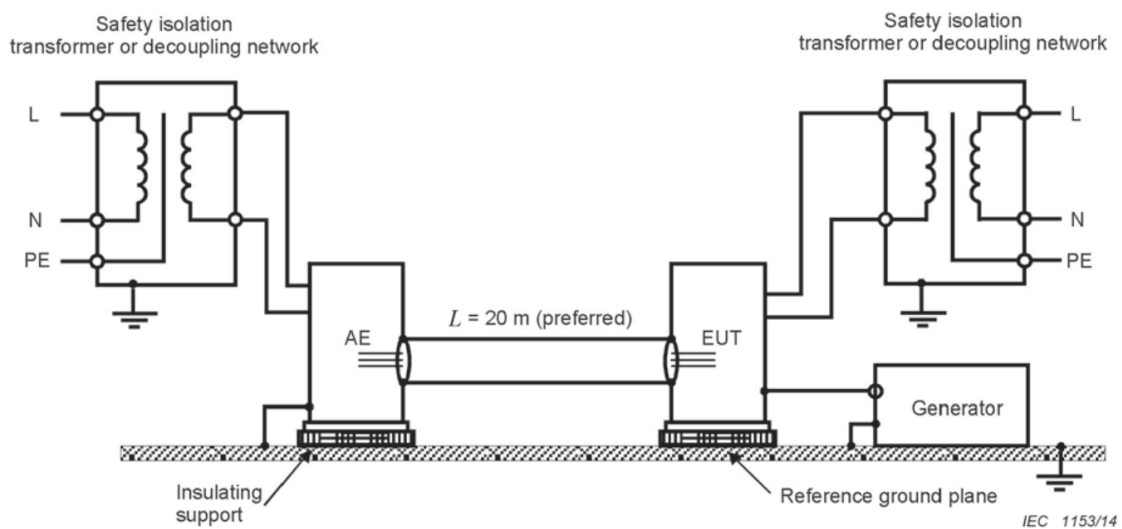


Figura 4.7: Esempio di set-up ideale per surge applicati a linee schermate. Si possono notare le misure di sicurezza prese per evitare di disturbare la rete elettrica su entrambi i lati, e la lunghezza del cavo che collega AE ed EUT, che lo standard consiglia essere di 20 m.

Il test deve essere svolto in condizioni climatiche ed elettromagnetiche tali da consentire il corretto funzionamento del dispositivo in prova. In nessun caso il test deve essere svolto in un ambiente in cui l'umidità sia talmente elevata da generare condensa sull'EUT o sull'apparecchiatura ausiliaria.

È obbligatorio sottoporre l'EUT ad un determinato numero di surge, per ogni tipo di accoppiamento (*line-to-line*, *line-to-ground*):

- Per **porte di alimentazione d.c. e linee di interconnessione**, cinque impulsi positivi e cinque negativi.
- Per **porte di alimentazione a.c.**, cinque impulsi positivi e cinque negativi per ogni fase. Le fasi da testare sono 0° , 90° , 180° e 270° .

Il tempo tra due surge successivi deve essere di al massimo un minuto.

In figura 4.8 si può trovare un esempio di set-up reale.



Figura 4.8: Esempio di set-up reale per la prova di immunità ai surge. [17]

5

Conclusioni

In questa tesi sono stati presi in considerazione tre standard per prove di immunità EMC della serie IEC 61000-4, in particolare il 4-2, riguardante le scariche elettrostatiche, il 4-4, riguardante i burst, e il 4-5, riguardante i surge. Per ognuno di questi standard sono stati messi a fuoco i livelli di test, le attrezzature necessarie allo svolgimento della prova, e i set-up proposti.

Con sempre più dispositivi elettronici al mondo, la ricerca sulla compatibilità elettromagnetica è essenziale per garantire che essi funzionino correttamente anche in presenza di interferenze. Ogni anno vengono effettuate ulteriori analisi in quest'ambito, e gli sviluppi che ne conseguono sono essenziali per affrontare le sfide future e continuare a migliorare la coesistenza dei dispositivi elettronici.

Bibliografia

- [1] International Electrotechnical Commission. *At the beginning*. URL: <https://www.iec.ch/history/how-why-iec-was-started>.
- [2] British Standards. «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-1: Testing and measurement techniques — Overview of IEC 61000-4 series». In: (Marzo 2007).
- [3] British Standards. «Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-5: Testing and measurement techniques — Surge immunity test». In: (Febbraio 2018).
- [4] British Standards. «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test». In: (Novembre 2012).
- [5] Taoyuan Branch Lin Kou Laboratories Bureau Veritas Consumer Product Services (H.K.) Ltd. «CE EMC Test Report No.: CE990301L25A». In: (Dicembre 2012). URL: <https://docs.broadcom.com/doc/12348827>.
- [6] British Standards. «Amendment 10 - International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 161: Electromagnetic compatibility». In: (Marzo 2021).
- [7] British Standards. «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test». In: (Marzo 2009).
- [8] Volta S.p.A. *ESD NX30*. URL: https://www.volta.it/prodotti/prove/emc/prove-condotte/domestico_industriale_iec_en/generatori-esd/esd-nx30/.
- [9] Bartek. *ESD1000 GENERATOR*. URL: <https://bartek.com/page/ESD.html>.

BIBLIOGRAFIA

- [10] Transient Specialist. *ESD Testing - Overview, Methods, Testing Explained*. URL: <https://transientspecialists.com/blogs/blog/esd-testing-equipment-methods-standards-air-contact-discharge>.
- [11] Ltd Shenzhen SEM.Test Technology Co. «EMC Measurement and Test Report No.: STR18098083E». In: (Settembre 2018). URL: <https://docs.rs-online.com/a46c/A700000007050921.pdf>.
- [12] LENOVO. *ThinkPad X1 Carbon Gen 10 (14" Intel)*. URL: <https://www.lenovo.com/it/it/itpartsales/c/ThinkPad-X1-Carbon-Gen-10-14-inch-Intel/p/LEN101T0009>.
- [13] InstrumentCenter. *Schlöder SFT 1400 Burst-Generator 125 kHz*. URL: <https://instrumentcenter.eu/products/emc-products/emc-generators-measuring-systems/schloeder-sft-1400-burst-generator-125-khz>.
- [14] Inc. William B. Cullen EMC Team Leader of Intertek Testing Services NA. «TEST REPORT No.: 100943193DAL-001». In: (Febbraio 2013). URL: <https://library.e.abb.com/public/a8df89864b6c41f7801f515f381b3879/EMC%20-%20Test%20Report%20-%20RS85.pdf>.
- [15] WH Technology Corp. «EMC Test Report No.: WH-CE-E22032901». In: (Aprile 2022). URL: <https://www.vecow.com/disUploadBox/PJ-VECOW/Files/8306.pdf>.
- [16] TheEMCShop. *Surge4-5 Combination Wave Surge Generator per EN/IEC 61000-4-5*. URL: <https://theemcshop.com/combination-wave-surge-generators/surge4-5-combination-wave-surge-generator-per-en-iec-61000-4-5/>.
- [17] Peng Liu. «EMC Test Report No.: 4842022311600». In: (Settembre 2022). URL: <https://www.vzense.com/uploads/files/20220929/3f2353e774a9a7dd52a85cd8c35cd862.pdf>.