



# TASSI DI GUASTO

## L'importanza dei test accelerati

**Francesco Nigri**  
(Tecnologo)



Le stime del tasso di guasto hanno un ruolo importante in molti settori industriali. In questo ambito, il MIL-HDBK-217F (standard pubblicato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti) resta tuttora un punto di riferimento importante perché elenca i tassi di guasto di varie tipologie di componenti largamente adoperati dall'industria elettronica, come resistori, condensatori, transistor, diodi.

Lo standard propone due metodi di stima del tasso di guasto:

- 1) il metodo di conteggio delle parti (Parts Count Method);
- 2) il metodo di analisi dello stress delle parti (Part Stress Analysis Method).

## Parts Count Method e Part Stress Analysis Method

Il *Part Stress Analysis Method* richiede informazioni più dettagliate del primo ed è generalmente utilizzato in fasi più avanzate di progettazione dei prodotti elettronici. Tale metodo di solito perviene a un tasso di guasto inferiore, e quindi a un livello di affidabilità maggiore, rispetto al metodo di conteggio delle parti che ha il pregio di essere più semplice e conservativo.

Il *Parts Count Method* perviene al tasso di guasto complessivo di un'apparecchiatura elettronica (equipment) avvalendosi della seguente relazione:

$$\lambda_{equip} = \sum_{i=1}^n N_i \times (\lambda_g \times \pi_Q)_i$$

$\lambda_{equip}$  :tasso di guasto totale dell'apparecchiatura;

$n$  :numero di differenti tipologie di componenti elettronici presenti nell'apparecchiatura;

$N_i$  :numero complessivo di componenti della i-esima tipologia;

$\lambda_g$  :tasso di guasto medio della i-esima tipologia di componente presente nell'apparecchiatura;

$\pi_Q$  :fattore di qualità che compete alla i-esima categoria;



Al tasso di guasto  $\lambda_g$  si può risalire in tre modi:

- può essere richiesto al fabbricante;
- può essere ricavato dai valori tabellati, elencati nel MIL-HDBK-217F;
- può essere stimato tramite l'effettuazione di test di vita accelerati, condotti in laboratorio su un campione significativo di diodi.

A seconda delle condizioni termoigrometriche in cui i diodi operano, il MIL-HDBK-217F porta a valori differenti del tasso di guasto. Per semplicità di trattazione, ho preferito concentrare l'attenzione sulla sola temperatura, prescindendo dall'influenza che sulla stima del tasso di guasto esercita l'umidità.

Obiettivo dell'articolo è mostrare il ruolo dei c.d. "test accelerati" nella stima dei tassi di guasto dei diodi. Il lavoro è infulcrato su una interessante pubblicazione di "Vishay Semiconductors" che ho ritenuto opportuno proporre all'attenzione dei lettori per il rigoroso approccio scientifico adottato dai suoi estensori. Altri spunti rilevanti sono stati tratti da un'apprezzabile presentazione del collega Paolo Giachin, disponibile in rete.

## Test accelerati

I fabbricanti sono interessati a immettere sul mercato componenti elettronici con il più basso valore possibile di:

- EFR (Early Failure Rate): tasso dei guasti prematuri;
- LFR (Long Failure Rate): tasso dei guasti a lungo termine.

Il tasso dei guasti prematuri (EFR) è una stima del numero dei guasti precoci, che normalmente si verificano in un intervallo di tempo compreso fra le prime 300 ore e le prime 1000 ore di vita operativa del componente. In pratica, questo intervallo di tempo copre il periodo di garanzia del componente. Bassi valori di EFR sono quindi molto importanti per i fabbricanti.

Il tasso dei guasti prematuri è pesantemente influenzato dalla complessità del componente. L'esperienza insegna che una progettazione accurata e un controllo di processo ottimizzato durante le fasi di ricerca, sviluppo e produzione del componente, riducono significativamente il valore di EFR. Normalmente, il tasso dei guasti prematuri è maggiore del tasso dei guasti casuali, che si identifica con l'LFR (Long Failure Rate) e caratterizza la c.d. "vita utile" del componente.



Fig. 1 - Early Failure Rate e Long Failure Rate

Molti fabbricanti condividono l'esigenza di minimizzare il c.d. "time to market", e cioè i tempi di immissione dei componenti sul mercato. L'accresciuta richiesta del mercato si traduce nella necessità di applicare, ai componenti in prova, cimenti di natura meccanica o termica sempre più intensi, in modo da ottenere informazioni sulla loro affidabilità in tempi sempre più brevi.

Dal momento che i meccanismi di guasto di molti componenti elettronici sono amplificati dall'aumento di temperatura, molti test accelerati si basano su variazioni cicliche di temperatura. Nel reticolo di un semiconduttore, infatti, un aumento della temperatura determina un incremento dell'agitazione molecolare che è causa di degradazione nel tempo.

Vale la seguente relazione, mutuata dalla teoria di Arrhenius che è alla base della termocinetica delle reazioni chimiche:

$$\lambda(T_{test}) = \lambda(T) \cdot e^{\left[ \left( \frac{Ea}{k} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]} \quad (1)$$

nella quale:

$\lambda(T_{test})$  è il tasso di guasto alla massima temperatura alla quale si sottopone il diodo nel corso del test di durata;

$\lambda(T)$  è il tasso di guasto alla massima temperatura alla quale si presume che il diodo possa essere assoggettato nel corso della sua vita operativa;

Ea rappresenta l'energia di attivazione (0,7 eV nel caso dei diodi), che avvia il processo di degradazione del reticolo del semiconduttore;

K è la costante di Boltzmann ( $8,62 \times 10^{-5}$  eV/K).



Dalla (1) si ricava:

$$\frac{\lambda(T_{test})}{\lambda(T)} = e^{\left[ \left( \frac{Ea}{k} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]}$$

(2)

Il rapporto fra  $\lambda(T_{test})$  e  $\lambda(T)$  viene definito fattore di accelerazione AF':

$$\frac{\lambda(T_{test})}{\lambda(T)} = AF'$$

La "JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council)", ente americano di normazione tecnica nel campo dei semiconduttori, nella raccomandazione "JESD51-2" adottata dalla "ASTM (American Society for Testing and Materials)", ha pubblicato i metodi operativi dei test accelerati ai quali si sottopone una vasta gamma di semiconduttori per stimarne il tasso di guasto prima dell'immissione sul mercato. In particolare, la raccomandazione "JESD51-2" consente di risalire alle caratteristiche della camera climatica utilizzata per l'effettuazione dei test accelerati.

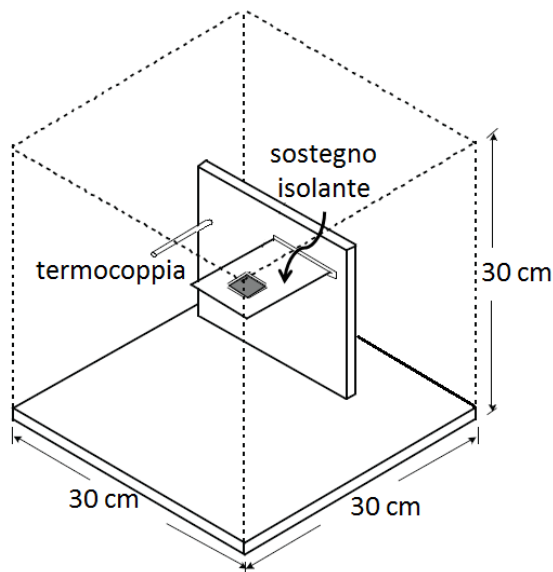


Fig. 2 – Camera climatica per l'effettuazione di test accelerati



All'interno della camera climatica, il componente viene sottoposto a una serie di cicli termici. Il fattore di accelerazione complessivo (acceleration factor, AF) si ricava dalla seguente relazione:

$$AF = \left( \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T} \right)^{1,90} \cdot \left( \frac{N}{N_{test}} \right)^{0,33} \cdot e^{\left[ \left( \frac{Ea}{k} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]} \quad (3)$$

La relazione (3), di carattere semi empirico, può essere così riscritta:

$$AF = (AF''') \cdot (AF'') \cdot (AF')$$

dove:

$$AF''' = \left( \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T} \right)^{1,90}$$

$$AF'' = \left( \frac{N}{N_{test}} \right)^{0,33}$$

$$AF' = e^{\left[ \left( \frac{Ea}{k} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]}$$

Si comprende meglio l'incidenza dei test accelerati con un esempio numerico, che si avvale della figura 3. I simboli hanno il seguente significato:

- $\Delta T_{test}$  è la massima escursione di temperatura che si registra in camera climatica nel corso del test;
- $\Delta T$  è la massima escursione di temperatura alla quale si presume che il componente possa essere assoggettato nella vita operativa;
- $N$  è il numero dei cicli per 24 ore, nell'uso ordinario (per esempio, 8 cicli nelle 24 ore);
- $N_{test}$  è il numero dei cicli per 24 ore, nel corso del test.

Con riferimento alla figura 3, si ha:

$$\left( \frac{N}{N_{test}} \right)^{0,33} = AF'' = \left( \frac{8}{24} \right)^{0,33} = 0,7$$



La figura riporta in verde l'andamento della temperatura che si registra in camera climatica. Il colore ciano evidenzia la temperatura effettivamente percepita dal componente in prova. La massima escursione di temperatura è pari a:

$$\Delta T_{test} = 72^{\circ}C - 13^{\circ}C = 59^{\circ}C$$

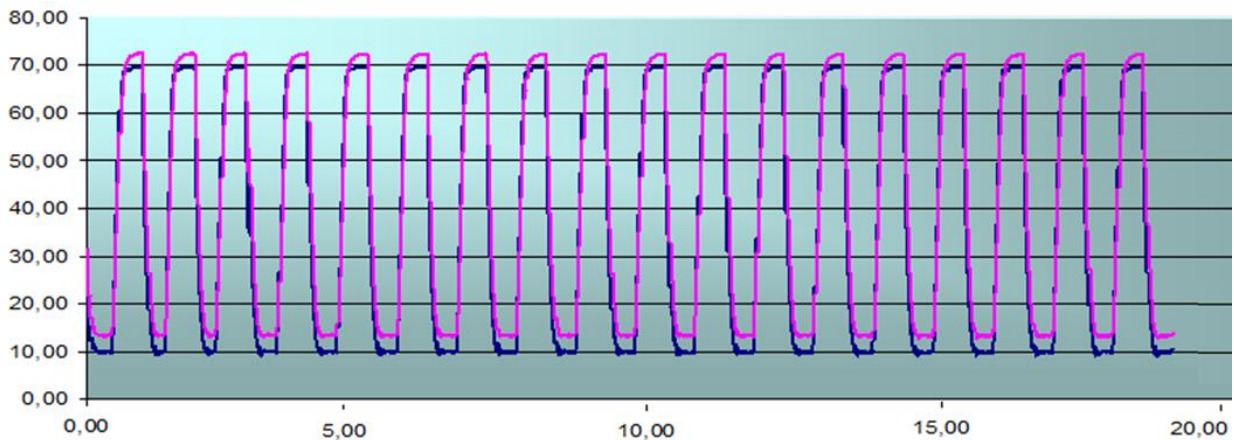


Fig. 3 – Cicli termici in camera climatica (Giachin)

Nell'ipotesi di lavoro secondo la quale  $\Delta T$ , massima escursione di temperatura alla quale si presume che il componente sia assoggettato nella vita operativa, è pari a:

$$\Delta T = 33^{\circ}C - 15^{\circ}C = 18^{\circ}C$$

si ottiene:

$$\left(\frac{\Delta T_{test}}{\Delta T}\right)^{1,90} = AF'''' = \left(\frac{59}{18}\right)^{1,90} = 9,5$$

Resta da calcolare:

$$e^{\left[\left(\frac{Ea}{k}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right]} = AF' = e^{\left[\left(\frac{0,7}{8,62 \times 10^{-5}}\right)\left(\frac{1}{306} - \frac{1}{345}\right)\right]} = 20,1$$

In definitiva:

$$AF = (AF''''') \cdot (AF''') \cdot (AF') = 9,5 \times 0,7 \times 20,1 = 133,4$$



Il risultato ottenuto porta a concludere che 72 ore di test in camera climatica equivalgono a 9605 ore di vita operativa.

## Intervalli di confidenza

Si abbia a disposizione un campione costituito da 500 diodi, provenienti da un lotto omogeneo di produzione. Tutti i diodi sono sottoposti a test in camera climatica per 75 ore, equivalenti a  $75 \times 133,4 = 10002$  ore di vita operativa.

Al termine del test, si registrano i seguenti risultati:

- N. 1 diodo cede dopo 8 ore di test, equivalenti a  $8 \times 133,4 = 1067$  ore di vita operativa;
- N. 1 diodo cede dopo 16 ore di test, equivalenti a  $16 \times 133,4 = 2134$  ore di vita operativa.

Non si rilevano altri guasti. Il tasso di guasto  $\lambda$  può essere così espresso:

$$\lambda [hr^{-1}] = \frac{r}{\sum_i (n_i \times t_i)}$$

(4)

dove:

- $r$  è il numero di guasti osservati nel corso del test (nel caso in esame  $r = 2$ );
- $n_i$  è il numero di componenti che giunge a rottura nel tempo  $t_i$ .

Nel caso in esame, si ottiene:

$$\lambda [hr^{-1}] = \frac{2}{[(1 \times 1067) + (1 \times 2134) + (498 \times 10002)]}$$

$$\lambda = 4,01 \times 10^{-7} \frac{1}{hr}$$

I risultati dei test sono di seguito riassunti in forma tabellare.





<b>N. di componenti in prova</b>	<b>500</b>			
<b>durata del test in camera climatica</b>	<b>75</b>	<b>hr</b>		
<b>N. di ore operative equivalenti</b>	<b>10002</b>	<b>hr</b>		
<b>N. dei guasti rilevati</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	
<b>istante di rilevazione dei guasti</b>	<b>8</b>	<b>hr</b>	<b>16</b>	<b>hr</b>
<b>N. di ore operative equivalenti</b>	<b>1067</b>	<b>hr</b>	<b>2134</b>	<b>hr</b>
<b>N. totale di componenti guasti (r)</b>	<b>2</b>			
<b>N. di componenti sopravvissuti</b>	<b>498</b>			
<b>tasso di guasto (<math>\lambda</math>)</b>	<b><math>4,01 \times 10^{-7}</math></b>	<b>hr<sup>-1</sup></b>	<b>0,04</b>	<b>% / 1000 hr</b>

funzionamento), si può anche affermare che  $\lambda$  è uguale a 401 FIT.

Come estendere il risultato ottenuto all'intera popolazione di diodi da immettere sul mercato? I dati sperimentali sono stati ottenuti sottoponendo a test accelerati un campione di componenti e non l'intera popolazione. Prima di utilizzare i dati sperimentali per valutazioni attendibili di affidabilità, bisogna accertare che il campione sottoposto a test sia rappresentativo dell'intera popolazione che si prende in esame. A tal fine, si introducono i c.d. "intervalli di confidenza".

Si utilizza una "distribuzione cumulativa standard", alla quale si dà il nome di "distribuzione  $\chi^2$ ". Tale distribuzione prevede l'applicazione di "intervalli di confidenza", entro i quali il valore di  $\lambda$  fluttua con una probabilità che dipende dall'ampiezza dello stesso intervallo di incertezza. In pratica, è utile riferirsi solo al limite superiore dell'intervallo di incertezza prefissato, che corrisponde al valore massimo del tasso di guasto  $\lambda$ . Al solito, il concetto appena espresso si assimila più facilmente con un esempio numerico.

Vale la seguente relazione:

$$\lambda_{1-SIDED} = \frac{\left(\frac{\chi^2}{2}\right)(r; P_A)}{(n \times t)}$$

(5)

Il valore del fattore  $\chi^2$  si ricava dalla tabella sottostante, noti i valori di  $r$  e  $P_A$ .

- $r$  è il numero totale di guasti osservati durante il test sul campione a disposizione (nel caso in esame  $r = 2$ );
- $P_A$  è il livello di confidenza prefissato;
- $n$  è l'entità del campione (nel caso in esame  $n = 500$ );



- $t$  è l'ampiezza dell'intervallo di tempo equivalente alla durata del test (nel caso in esame  $t = 10002$  ore).

intervallo confidenza $P_A = 60\%$		intervallo confidenza $P_A = 90\%$	
N. di guasti $r$	fattore $\chi^2$	N. di guasti $r$	fattore $\chi^2$
0	1,833	0	4,605
1	4,045	1	7,779
2	6,211	2	10,645
3	8,351	3	13,362
4	10,473	4	15,987
5	12,584	5	18,549
6	14,685	6	21,064
7	16,780	7	23,542
8	18,868	8	25,989
9	20,951	9	28,412
10	23,031	10	30,813
11	25,106	11	33,196
12	27,179	12	35,563

Tab. 2 – Valori del fattore  $\chi^2$

Inizialmente si considera un livello di confidenza pari al 60%.

Se si entra in tabella con questi due valori:

- $r = 2$ ;
- $P_A = 60\%$ ,

si ottiene:

$$\lambda_{1-SIDED} = \frac{\left(\frac{6,211}{2}\right)}{(500 \times 10002)} = 6,21 \times 10^{-7} \frac{1}{hr}$$



Il risultato ottenuto consente di affermare che il 60% della popolazione è caratterizzato da un tasso di guasto che non eccede il valore di 621 FIT.

Si considera successivamente un livello di confidenza pari al 90% e si entra in tabella con questi due valori:

- $r = 2$ ;
- $P_A = 90\%$ .

Si ottiene, infine:

$$\lambda_{1-SIDED} = \frac{\left(\frac{10,645}{2}\right)}{(500 \times 10002)} = 1,06 \times 10^{-6} \frac{1}{hr}$$

Il risultato conseguito permette di affermare che il 90% della popolazione è caratterizzato da un tasso di guasto che non supera il valore di 1065 FIT.

## Alcune considerazioni conclusive

Quando si effettuano test accelerati, un errore ricorrente nella valutazione del fattore di accelerazione (AF) consiste nella mera moltiplicazione dei fattori di accelerazione parziali, che derivano dai vari fattori di stress introdotti, senza stimarne adeguatamente l'impatto: tale operazione di moltiplicazione dei fattori di accelerazione parziali ha senso esclusivamente se è una sola la modalità di guasto (failure mode) attesa.

Inoltre, un fattore di accelerazione parziale relativamente elevato, riguardante un fattore di stress ben determinato, spesso indica una condizione di "over-stress" del componente in prova, che inevitabilmente porta a risultati poco attendibili. Per questa ragione, in presenza di fattori di accelerazione parziali elevati, per esempio superiori a 100, è opportuno prestare particolare attenzione al "failure mode", sia in fase di progettazione del test che in fase di valutazione dei risultati, nell'ottica secondo la quale a ciascun tipo di stress possono essere associati uno o più specifici "failure modes".

Qualora il test effettivamente evidenziasse più failure modes, durante la fase di analisi dei risultati sarà necessario individuare la "root cause", e cioè la causa alla base di ciascuna modalità di guasto. Ciò è particolarmente importante quando i guasti riguardano le interfacce e non i componenti in sè. A titolo di esempio, si prendano in considerazione i "solder joints" tra circuito stampato e componente elettronico e, in particolare gli SMD. Il cedimento di un solder joint è generalmente causato da stress termomeccanico. In questo caso l'energia di attivazione, della quale si è fatto cenno nel corso



dell'articolo, gioca un ruolo irrilevante per cui è inappropriato applicare fattori di accelerazione derivanti dalla formula di Arrhenius.

In altri termini, se durante un test accelerato, alimentato con cicli termici, ci si trovasse di fronte alla rottura di un solder joint, sarà sempre opportuno chiedersi se i cicli siano stati causa di overstress termomeccanico, pena la parziale inattendibilità dei risultati conseguiti.

## Riferimenti

[1] Vishay Semiconductors, Reliability, Document Number 80099, Rev. 1.3, 2008

[2] Paolo Giachin, Affidabilità nei sistemi elettronici, 2006

## Riconoscimenti

L'autore intende esprimere la sua gratitudine al collega Paolo Giachin per la fattiva e preziosa collaborazione nel corso della stesura dell'articolo.