

***Nella realizzazione di HV-PSU (High Voltage-Power Supply) la sezione ad AT (alta tensione) soggetta a decine o centinaia di kV, è spesso sede di problemi qualitativi. L'articolo vuole dare una linea guida in questo specifico campo, nell'ottica del continuo miglioramento attraverso i seguenti argomenti: la durata dell'incapsulazione; l'aspetto termico; gli inquinanti; l'uso del prime; le riparazioni***

## L'arte dell'incapsulamento con gomme siliconiche

Roberto Amort



Fig. 1 - L'ugello statico per la mescolatura e inserimento gomma siliconica

**N**egli ultimi anni l'interesse rivolto all'incapsulamento di parti elettroniche che utilizzano gomme siliconiche a polimerizzazione per addizione è cresciuto notevolmente. Questi elastomeri non contengono sostanze corrosive, sono pressoché atossici, autoestinguenti, hanno un'ottima stabilità dimensionale (Tab. 1) e rigidità dielettrica (che cresce leggermente all'aumentare della temperatura).

Molte applicazioni con i siliconi hanno visto affrontate e risolte nel miglior modo problematiche lasciate irrisolte

dall'utilizzo degli oli, minerali o siliconici, anche se quest'ultimi hanno una rigidità dielettrica di 3-4 volte superiori alle resine (Tab. 1), che tuttavia diminuisce all'aumentare della temperatura. Gli oli richiedono contenitori, connettori verso l'esterno e membrane d'espansione perfettamente stagni, e tutto questo rappresenta un costo aggiuntivo.

Le gomme siliconiche d'altra parte non richiedono tutto ciò e come contenitore dell'incapsulante si utilizza solitamente il fondo dello chassis, nell'evenienza sigillato temporaneamente con colla termoindurente. Si tratta quindi di applicazioni dove l'incapsulante svolge prettamente i ruoli d'isolamento elettrico, conduce il calore verso l'esterno e contiene meccanicamente componenti, in applicazioni di HV-PSU. Il risultato è una sezione ad AT estremamente affidabile, robusta e con dimensioni compatte. Il loro utilizzo è giustificato anche da

altri benefici, come la miglior conducibilità termica rispetto agli oli (più di un ordine di grandezza maggiore con resine opportunamente caricate, paragonabili dunque alla conducibilità di un "Sil Pad", Tab. 1), la praticità nell'effettuare prototipi con resine trasparenti ed eseguire riparazioni rimuovendo e reincapsulando parte della gomma siliconica della sezione ad AT.

Tuttavia anche questa tecnica di contenimento dell'AT nasconde insidie che se ignorate potrebbero ridurre la vita dell'inglobamento, causando talvolta guasti catastrofici.

### La durata dell'incapsulazione

Con l'operazione d'incapsulare componenti ad AT si è portati a pensare di ottenere un blocco unico, di eterna durata. Tuttavia, per avvicinarsi a ciò occorre un'attenzione particolare e applicare correttamente speciali procedure, sin dalle prime fasi di progettazione.

Per ottenere elevati livelli di affidabilità del processo è indispensabile ricordare di adottare un reparto d'incapsulamento a "stanza isolata", con precisi livelli di temperatura e umidità. Oltre a ciò è necessario uno specifico sistema di proporzionamento, miscelazione e dosaggio (la miscelazione è un elemento da tenere sotto stretta osservazione; utilizzando adeguati miscelatori statici intercambiabili, si ottengono livelli di mescolatura uniformi nel tempo).

Il progettista, dal canto suo, deve considerare se per la parte ad AT ci si dovrà affidare all'isolamento "per distanza superficiale" oppure alla completa "adesione tra incapsulante e componente". Con la prima strada si ottiene alta affidabilità anche se in maggiori dimensioni, mentre con la seconda, per ottenere una buona adesione tra superfici dei vari componenti ed elastomero, ha bisogno di un trattamento pre incapsula-

mento di tutte le parti ad AT, tramite una pulitura profonda con la tecnologia Plasma Etching: questo procedimento può risultare costoso e inoltre molti utilizzatori finali bocchiano la progettazione basata su questo principio. La sua utilizzazione è quindi riservata ad applicazioni speciali ove la pulitura con sistemi tradizionali non può avere luogo, non è efficace oppure, quando sono richieste dimensioni estremamente compatte ad altissime tensioni (vedi anche paragrafo "L'uso del primer").

Si analizza ora il più comune dei metodi utilizzati per il contenimento della parte ad AT, dove ci si affida all'isolamento "per distanza superficiale".

Il progettista, ricordando che 1mm d'elastomero garantisce un isolamento, ad esempio di 20kV (Tab. 1), mentre 1mm di superficie pulita garantisce circa 400V, disegnerà accuratamente la parte ad AT, interponendo dovuti canali o labirinti per aumentare la distanza superficiale e garantire l'isolamento, anche nel caso in cui la gomma siliconica non aderirà perfettamente con le superfici dei componenti usati (vetro, ceramica, contenitori metallici e PCB). È necessario adottare tutti gli accorgimenti per limitare al minimo l'effetto corona togliendo ogni eventuale sbavatura metallica, arrotondando gli spigoli vivi, rendendo le saldature a forma di cupola e utilizzando sfere o tubetti metallici per rivestire terminazioni sottili (attenzione anche al lato 0V oltre a quello sotto tensione: ad esempio un filetto di una vite

dello chassis che entra nella zona ad AT, anche se a massa, costituisce una potenziale zona d'alto gradiente corona).

Nel caso di apparecchi di dimensioni relativamente grandi con volumi a partire, ad esempio, da circa un kg di gomma siliconica, che utilizzano superfici relativamente grandi di PCB e/o schermi metallici AT, è buona regola per evitare problemi di laminazione dovute all'immagazzinamento a temperature basse del HV-PSU (ad esempio a seguito di trasporti aerei o su gomma in climi rigidi, dove le basse temperature potrebbero ridurre la flessibilità degli elastomeri). La soluzione potrebbe essere quella di praticare una serie di fori lungo i bordi dei PCB e schermi statici ad AT, oppure utilizzare un copri spigolo in materiale isolante, come rappresentato in figura 2. Questi accorgimenti eviteranno che grandi parti di elastomero perdano l'aderenza meccanica in corrispondenza di spigoli vivi (il solder resist del PCB nella parte ad AT, non va applicato).

### L'aspetto termico

Un altro parametro da considerare è il coefficiente termico d'espansione. Più alta è la densità della gomma siliconica impiegata, inferiore sarà il suo coefficiente termico e comunque molto più elevato di altri incapsulanti come le resine epossidiche o poliuretatiche.

Una semplice regola è che riscaldando un elastomero di 100°K il suo volume cresce approssimativamente del 10%



Fig. 2 - Il copri spigolo, evita distacchi dell'elastomero

**TABELLA 1 - DATI A CONFRONTO**

	OLI	ARIA	SILICONI PER ADDIZIONE	Unità di misura
RIGIDITÀ DIELETTICA	30-75	2.4	>20-35	kV/mm
CONDUCIBILITÀ TERMICA (*con fluido fermo)	0.10-0.15*	0.024*	0.5-1.5	W/mK
DILATAZIONE TERMICA	8 % circa ogni 100K	n.a.	1.5-3x10 <sup>4</sup> (10 % circa ogni 100K)	m/mK
COSTANTE DIELETTICA	2-3	1	3-5	F/m
DENSITÀ	0.85-0.97	0.0013 a livello mare	1-3	g/cm <sup>3</sup>
COSTO (INDICATIVO)	4-14€/l	n.a.	10-20	€/kg

(Tab. 1). Quando questo fattore non è tenuto in considerazione, subentrano problemi di malfunzionamento ad esempio nei trasformatori switching inglobati, sottoposti a carichi sostenuti in funzionamento vicino alla temperatura massima d'esercizio e ambiente (la forza applicata su ferriti componibili dovuta all'espansione termica fa aumentare il gap nel circuito magnetico, anche se ben ancorato, degradando l'efficienza di funzionamento).

Per evitare che ciò accada, occorre incapsulare a temperatura maggiore di quella ambientale, riscaldando e mantenendo ad esempio l'incapsulazione alla massima temperatura d'esercizio previsto, fino a vulcanizzazione completata, con anche il vantaggio di ridurre i tempi dell'operazione.

### Gli inquinanti

Alcuni materiali a contenuto di zolfo come gomma naturale o sintetica, ammina (largamente usate come intermedi colorati, materie plastiche, detergenti, ecc.) e naturalmente oli, grasso, cere, vernici e plastilina oltre che a elementi contenuti nei composti poliuretani ed epossidici, inibiscono la catalizzazione dei polivinilsilossani, riducendo drasticamente il contenimento elettromeccanico (il silicone non reticola) poiché l'acido cloro platinico contenuto nel catalizzatore, reagisce con i materiali. Se è necessario utilizzare gomma nella parte AT (ad esempio tubetti, O ring, ecc), è consigliabile scegliere il

tipo termoplastico o siliconico. Attenzione dunque, ai condensatori elettrolitici che usano gomme a base di zolfo come sigillo del contenitore in alluminio: potrebbero reagire con l'elastomero. Altri componenti su cui porre attenzione sono gli adesivi dei nastri isolanti ad esempio quelli usati per fermare avvolgimenti. Nel dubbio, è molto semplice ed efficace, eseguire dei test di compatibilità, tra elastomero e componenti utilizzati.

Un ulteriore fattore da considerare sono i residui della saldatura.

Per ottenere un buon risultato è il caso di utilizzare Water-Clean solder; stagno con fluxante lavabile in acqua. Per gli avvolgimenti e trasformatori e altri componenti che non vanno lavati, montati prima dell'incapsulamento ma dopo il processo di pulitura, è bene saldarli invece con No-Clean solder; stagno con bassi residui non lavabili (vedi anche paragrafo Riparazioni).

## Tabella: istruzioni per l'uso

**In prima istanza la dilatazione termica dei siliconi è maggiore di quella dell'olio. Tuttavia con gli elastomeri, non avendo dei contenitori stagni ma aperti, l'espansione di volume non provoca problemi particolari. Va comunque considerata (vedi ultima parte capitolo "Il fattore termico"):**

- per realizzare sezioni ad AT leggere occorrerebbe utilizzare l'aria come unico isolante anche se questo va a scapito delle dimensioni poiché sono necessari particolari accorgimenti. Con queste realizzazioni è anche facilitato lo smaltimento di calore da delicati componenti utilizzando una circolazione forzata d'aria. Le eventuali riparazioni in questo caso saranno più semplici rispetto agli altri 2 tipi di contenimento. Tuttavia polvere e umidità potrebbero causare problemi;

- per circuiti che lavorano ad alte frequenze è certamente da considerare un altro dato importante: la costante dielettrica. I circuiti che utilizzano oli o siliconi hanno una capacità distribuita maggiore visto che l'elemento dielettrico è diverso dall'aria. In taluni casi sarà più difficile trasferire la potenza con trasformatori a ferrite giacché la capacità distribuita della sezione ad AT, secondaria, riportata al primario dipende dal quadrato del rapporto spire. In particolare va considerato che utilizzando siliconi con conducibilità termiche maggiori si avrà anche lo svantaggio di una maggiore costante dielettrica.

## L'uso del primer

Come accennato precedentemente, le resine silconiche aderiscono scarsamente se non per nulla a certe superfici. L'uso del primer può essere considerato come un'economica alternativa che sta nel mezzo tra affidarsi alla distanza superficiale per l'isolamento e la perfetta adesione tra componente e gomma silconica ottenibile col procedimento Plasma Etching. L'uso di un adeguato primer conferisce una buona adesione con molti elementi dei componenti normalmente impiegati nella sezione AT, quali metalli utilizzati negli chassis, vetro, ceramiche e molte plastiche. Questa soluzione permette di ottenere eventualmente anche dimensioni inferiori. L'uso del primer è comunque indicato per risolvere il problema delle micro scariche interne che in taluni circuiti ad AT può essere causa di intensi Emi. Tuttavia quando nei contenitori è previsto un coperchio per accedere alla parte AT e contenere la colata di gomma silconica, non può essere utilizzato il primer altrimenti dopo la vulcanizzazione aderirebbe e la sua successiva rimozione diverrebbe difficile. L'imperfetta adesione del coperchio non primerizzato con la gomma silconica, lascia però un interstizio d'aria, che può generare micro scariche elettrostatiche tra superficie della gomma silconica che contiene l'AT e il coperchio a livello di 0V. È dunque il caso di prevenire l'utilizzo di uno schermo a rete metallica a maglia di 5-8mm ad esempio, collegato a potenziale di 0V, posto appena sotto il livello della gomma silconica. Questo è un ottimo rimedio per le micro scariche perché chiude efficacemente le correnti disperse che attraversano la gomma silconica chiudendosi a massa tramite lo schermo. Inoltre è un'efficace sicurezza ad accidentali intrusioni o scariche fortuite verso l'operatore che effettua test senza coperchio. Naturalmente lo svantaggio d'uso del primer è che le eventuali successive riparazioni saranno ardue e se attuate molti componenti

andranno sostituiti, perché danneggiati nell'azione di rimozione della gomma silconica.

## Le riparazioni

Vista la delicatezza dell'operazione, questo argomento di solito è lasciato al tecnico del service e richiede una continua preparazione non solo teorica, ma anche pratica. La cura di questa fase è indispensabile per ottenere una riparazione duratura ad alta affidabilità. Quando si

**Nel testo si utilizzano i seguenti vocaboli come sinonimi:**

- gomma silconica, siliconi, incapsulante, elastomero, polivinilsilossani;
- incapsulare, incapsulazione e reincapsulare, inteso come azione di "colare la gomma silconica" o all'inglese l'azione di "to pot" oppure "potting"

rimuove la gomma silconica è necessario considerare in anticipo di:

- contenere il tempo tra inizio rimozione e successivo incapsulamento (un valore comunemente adottato potrebbe essere 30-40 min.), per garantire un minimo di adesione tra l'elastomero reticolato e quello nuovo, evitando la contaminazione superficiale. Prevenire di rimuovere altra gomma silconica se la riparazione si protrae più a lungo;
- usare eventuali prodotti per favorire l'adesione con la resina vulcanizzata (a base di acido acetico);
- rendere sempre le superfici estremamente rugose, dopo aver utilizzato ad esempio, il bisturi per il taglio. Questa operazione aumenta sia la distanza superficiale sia l'aderenza del successivo inglobamento;
- fare particolare attenzione a non lasciare rotture, dovute a tagli, crepe o sottosquadre che scendono sotto il livello di rimozione, nella gomma silconica;
- effettuare l'incapsulamento sotto vuoto, per evacuare possibili bolle d'aria intrappolate durante la rimozione della gomma silconica;

- l'uso di No-Clean solder; stagno con bassi residui non lavabili è di basilare importanza in questa operazione e come visto in taluni casi in produzione. È importante non tentare di lavare le parti riparate, neppure con solventi, poiché il flussante anche se in piccole parti sarebbe spalmato sulla superficie e non rimosso, riducendo l'isolamento superficiale e l'aderenza;

- ultimo ma importantissimo punto, prima di reincapsulare verificare accuratamente le varie parti a vari livelli d'AT. Vanno ripristinate le distanze superficiali dovute al taglio e all'asportazione della gomma silconica. Per una corretta riparazione, è sempre il caso di aumentare il percorso del taglio della gomma silconica vulcanizzata, specialmente verso l'esterno a 0V dove la deltaV è maggiore. Va considerato in ogni modo il caso più sfavorevole d'isolamento, in altre parole di separazione tra vecchia e nuova gomma

silconica e quindi riconsiderati i 400V/mm. Se questa operazione non può essere garantita o se presa in scarsa considerazione prima dell'intervento, è bene rimuovere l'intero volume.

## I dielettrici a confronto

Aria: meno peso, frequenze di funzionamento maggiori, costi inferiori a scapito di ingombri maggiori (eventuali problemi con umidità elevate).

Siliconi: più peso, frequenze di funzionamento inferiori a vantaggio di costi e ingombri relativamente bassi.

Olio: più peso, frequenze di funzionamento inferiori costi e ingombri maggiori.

Da notare che gli ultimi due dielettrici, impediscono il contatto con gli agenti atmosferici. Polvere, umidità o altri contaminanti non degraderanno la sezione ad AT. In particolare l'incapsulante solido, i siliconi, a differenza d'olio e aria, ha l'ulteriore vantaggio di rendere la sezione ad AT molto resistente alle vibrazioni. Va dunque scelta questa soluzione quando la "maintenance free" è prioritaria. 