

PASSIFS

Choisir la bonne technologie de résistance sans se tromper

Les fiches techniques des résistances contiennent une foule d'informations qui s'avèrent parfois incomplètes. Et pour accroître la difficulté, ces fiches s'appuient souvent sur une terminologie qui peut varier d'un fournisseur à l'autre. Nous nous emploierons, dans cet article, à décrire quelques termes clés susceptibles d'être rencontrés par les concepteurs dans la documentation technique, tels que la tolérance, le coefficient de température de résistance (TCR) ou les résistances appariées en TCR, et à fournir des pistes pour choisir la technologie de résistance la mieux adaptée à l'application ciblée.

Le choix des résistances les mieux adaptées à une application donnée est loin d'être banal. Cela est dû essentiellement au fait que les concepteurs, au moment où il faut se décider pour tel ou tel composant, telle ou telle technologie de résistance, n'ont pas toujours en leur possession toutes les informations qui leur permettraient de faire le bon choix. En effet, les fiches techniques des résistances délivrées par les fournisseurs, si elles contiennent une foule d'informations, sont parfois incomplètes. Dans certains cas, les spécifications mériteraient même d'être soumises à la sagacité d'un service juridique pour y lire entre les lignes. Il faut par conséquent se méfier des caractéristiques à première vue alléchantes, car elles sont précisément présentées dans ce but, et surtout ne pas prendre de décisions de conception sans avoir préalablement bien lu et compris le reste de la fiche technique. D'autant que, pour corser le tout, les fiches techniques des composants s'appuient souvent sur une terminologie qui peut varier d'un fournisseur à l'autre.

Nous nous emploierons, dans cet article, à décrire quelques termes clés susceptibles d'être rencontrés par les concepteurs dans la documentation technique des résistances. A commencer par la tolérance, puis le coefficient de température de résistance (TCR) ou



YUVAL HERNIK (VISHAY PRECISION GROUP)

Depuis 2008, Yuval HERNIK dirige le département d'ingénierie des applications de Vishay Precision Group utilisant les résistances à feuille métallique Bulk Metal. Il est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en électricité du Technion (Israel Institute of Technology).

les résistances appariées en TCR, en expliquant à quoi ces notions corres-

pondent réellement, et à fournir des pistes pour choisir la technologie de résistance la mieux adaptée à l'application ciblée.

Tolérance

La tolérance englobe de nombreuses significations, qui vont de la tolérance lors de l'achat (tolérance initiale) à la tolérance en fin de vie du composant (bilan d'erreur total). Lors de la sélection d'un composant, le dernier paramètre à prendre en compte est sa tolérance initiale. En revanche, la première chose à connaître est sa tolérance limite à la fin de sa durée de vie, qui constitue un facteur indispensable à la conception des circuits. Chaque composant doit faire l'objet d'un bilan d'erreur total qui, en cas de dépassement, fera que l'équipement présentera des performances inférieures à ses caractéristiques, voire des risques de défaillance. Outre la tolérance initiale, le bilan d'erreur prend en considération

les écarts limites admissibles pendant la durée de vie, l'assemblage, le TCR, la résistance aux chocs, aux vibrations, à l'humidité et aux chocs thermiques, la force électromotrice (FEM) thermique, la dérive en charge, les décharges électrostatiques (ESD), le rayonnement et enfin, la distorsion harmonique. La technologie de résistance particulière qui sera choisie doit être celle qui présente le moins de variations possible sous les différentes conditions de contraintes. Ainsi, il faut additionner toutes les valeurs de ΔR escomptées et les soustraire de la tolérance limite en fin de vie afin de déduire la tolérance lors de l'achat. La nomenclature (BOM) spécifie ensuite le modèle de résistance d'après sa valeur de résistance, sa tolérance et, dans certains cas, son coefficient de température TCR (qui est généralement nominal, ou restreint à une plage de températures spécifique). Bien que les limites de ΔR ne soient pas systématiquement précisées dans la nomenclature, il s'agit là d'une caractéristique cruciale pour déterminer la technologie de résistance adaptée à l'application. C'est la raison pour laquelle des

CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉSISTANCE SUR LES CIRCUITS À BATTERIE LITHIUM-ION

TECHNOLOGIE	COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE DE RÉSISTANCE (TCR) DE -55°C À +125°C, RÉF. +25°C	TOLÉRANCE INITIALE	TOLÉRANCE EN FIN DE VIE	STABILITÉ EN CHARGE À +70°C SOUS PUISSANCE NOMINALE À 2000 HEURES ET 10000 HEURES	ESD (V)	TEMPS DE STABILISATION THERMIQUE	BRUIT (dB)
Bulk Metal Foil	±0,2ppm/°C à 2ppm/°C	À partir de 0,001%	< 0,05%	0,005% (50ppm), 0,01% (100ppm)	25000	< 1 s	-42
Couche mince	±10 à 25ppm/°C	À partir de 0,05%	< 0,4%	0,05% (500ppm), 0,15% (1500ppm)	2500	> quelques minutes	-20
Couche épaisse	±75 à 100ppm/°C	À partir de 0,5%	< 5%	0,5% (5000ppm), 2% (20000ppm)	2000	> quelques minutes	20
Bobinage	±3ppm/°C	À partir de 0,005%	< 0,5%	0,05% (500ppm), 0,15% (1500ppm)	25000	> quelques minutes	-35

Sont indiquées dans ce tableau les principales caractéristiques de différents types de technologies de résistance sur les circuits à batterie Lithium-ion.

résistances de haute précision qui possèdent les mêmes caractéristiques de résistance, de tolérance et de TCR, mais appartiennent à des technologies différentes, ne sont pas interchangeables ; ceci provient du fait que leur évolution sur l'ensemble de leur durée de mise en service n'est pas la même. Remplacer un composant sans tenir compte de la technologie de la résistance peut ainsi entraîner des erreurs néfastes pour les performances, et donc pour la réussite du projet. Seul l'ingénieur OEM qui a effectué l'analyse du bilan d'erreur est habilité à déterminer une substitution acceptable (voir tableau).

Afin d'être envisagés en tant que substituts, les composants doivent présenter des performances définies de manière exacte, complète, spécifique et détaillée et ce, sous toutes les contraintes et toutes les expositions, afin de garantir leur parfaite adéquation, sans réduire la fiabilité ni raccourcir la durée de vie de l'équipement. Dans le cas, notamment, des circuits à haute précision utilisant des résistances à fiabilité élevée avec des tolérances serrées, le fabricant ne doit pas se contenter de mesurer les résistances au moment de l'expédition. Son équipement doit également être étalonné et traçable par le NIST (*National Institute of Standards and Technology*, anciennement dénommé *National Bureau of Standards*) ou le LNE pour la France. Les mesures effectuées doivent inclure une marge de sécurité qui restreint les erreurs de mesure aux tolérances mesurées. Cette exigence s'applique à la totalité des résistances. En outre, le fabricant OEM doit, à la réception, s'assurer que les résistances sont bien conformes aux tolérances spécifiées, et n'ont pas été « contournées » en prenant en compte une tolérance susceptible d'avoir été affectée par les conditions de température et d'humidité durant le transport. Malheureusement, les inspections de vérification effectuées par de nombreux équipementiers sont réalisées avec un étalonnage inadéquat pour évaluer correctement les résistances à tolérances strictes, ce qui les contraint à s'en remettre à la bonne foi du fournisseur. Qui plus est, certaines entreprises envoient directement en production les composants achetés en ignorant complètement l'étape d'inspection préalable à l'arrivée. Il faut par conséquent veiller, dans le cas d'une application importante, à ce que le fournisseur soit accessible afin de réaliser des inspections de qualification et des contrôles qualité réguliers. Le client final doit également évaluer si la tolérance spécifiée par un fabricant est réellement adaptée à l'usage. A titre d'exemple, certaines résistances couche mince CMS (à monter en surface) sont parfois proposées avec des tolérances très resserrées alors que les valeurs de résistance sont très faibles. Certes, cela peut sembler très impressionnant sur le papier, mais cela n'est guère compatible

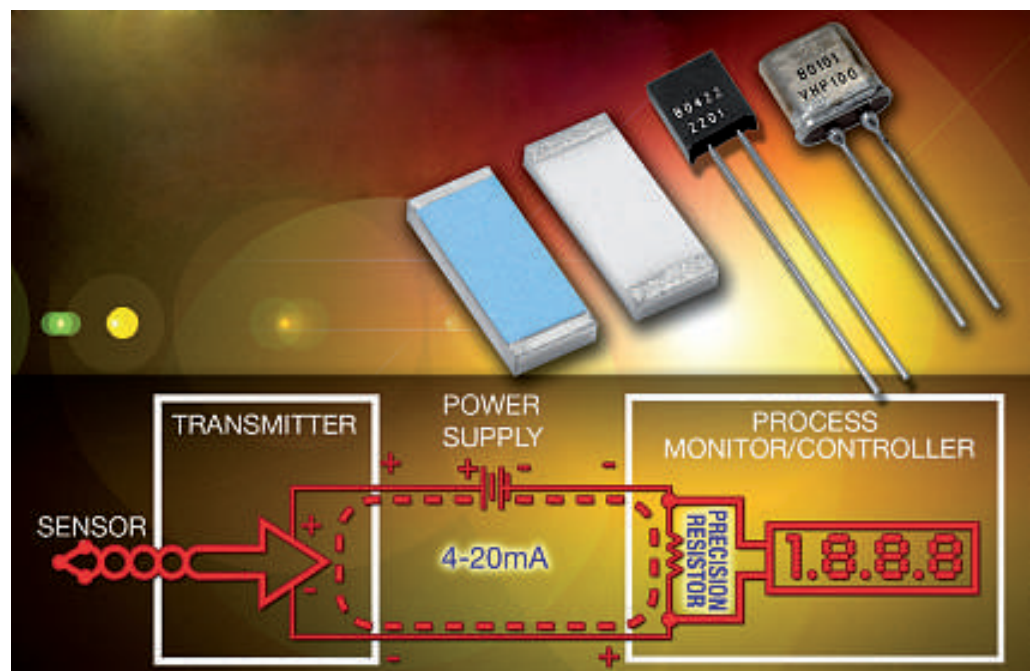
avec le processus d'assemblage. Du fait que ces composants sont soudés directement sur la carte, il se produit une variation de la résistance due à la température de la soudure. Les extrémités de la soudure fondent, coulent, puis se solidifient à nouveau, en modifiant dès lors les valeurs de résistance. Sur les résistances de faible valeur, l'ampleur de cette variation est beaucoup plus grande que la tolérance spécifiée. Ainsi, après avoir payé un prix plus élevé pour une tolérance trop serrée, le client se retrouve avec des résistances de tolérance moindre une fois leur assemblage effectué sur le circuit imprimé.

Coefficient de température de résistance (TCR)

Le TCR est un critère particulièrement important, car il fait souvent l'objet d'erreurs, voire d'une absence totale d'interprétation. Ce coefficient fait pourtant, lui aussi, partie des caractéristiques qui influent sur les performances du circuit dès le premier jour de sa mise en service. Le TCR passe d'ailleurs souvent pour être une

d'une exposition de 30 minutes à chacune des températures. En situation réelle, les résistances qui se présentent sous forme de composants physiquement différents ont des temps de réponse thermique divers. Contrairement aux conditions de mesures, il se peut que des résistances montées sur un circuit fonctionnent toutes à des températures différentes, non seulement les unes par rapport aux autres, mais aussi en fonction de la température ambiante. Les procédures de mesures normalisées sont dictées par les protocoles industriels. En règle générale, la résistance est mesurée à une température de référence, ainsi qu'à une température plus basse et une autre plus élevée, le TCR étant alors défini comme la valeur de $\Delta R/R_{\text{réf}}$ dans la plage froide et de $\Delta R/R_{\text{réf}}$ dans la plage chaude.

Pour les applications du domaine militaire, ces températures sont respectivement de 25°C, -55°C et +125°C. Le TCR défini comme le rapport de $\Delta R/R$ à ΔT sur la base de seulement deux mesures (+25°C à -55°C ou +25°C à +125°C) suppose que le TCR est linéaire, même



➤ Les composants représentés ici sont des résistances de précision pour boucles de courant de 4 mA à 20 mA.

indication du niveau de performance global d'une résistance. On admet, et cela est généralement vérifié, que plus le TCR est élevé, meilleure est la précision de la résistance. Ceci implique donc que si le TCR n'est pas défini de manière précise et complète, cette hypothèse est inexacte et donc que l'utilisation de cette résistance invalide toutes les évaluations de précision, de stabilité et de fiabilité réalisées par le concepteur du circuit.

Le TCR spécifié sur les fiches techniques provient de mesures effectuées alors que les résistances se sont déjà stabilisées à une température spécifiée, suivant les limites d'une plage thermique donnée et, généralement, à raison

si la fonction $\Delta R/R = f(t)$ est une parabole. La courbe de TCR caractéristique peut donc sembler n'être que linéaire, puisque sa base repose sur deux mesures situées respectivement dans la plage chaude et dans la plage froide, et que deux points définissent toujours une droite, même s'ils sont en réalité situés sur une courbe. Or le TCR instantané entre ces deux températures de mesures extrêmes peut être beaucoup plus élevé. Il ne faut donc jamais partir du postulat que le TCR reste identique à des plages de températures différentes, sauf en cas d'utilisation de la technologie Bulk Metal, dont le TCR nominal est tellement faible qu'il demeure fondamentalement linéaire sur toute la plage

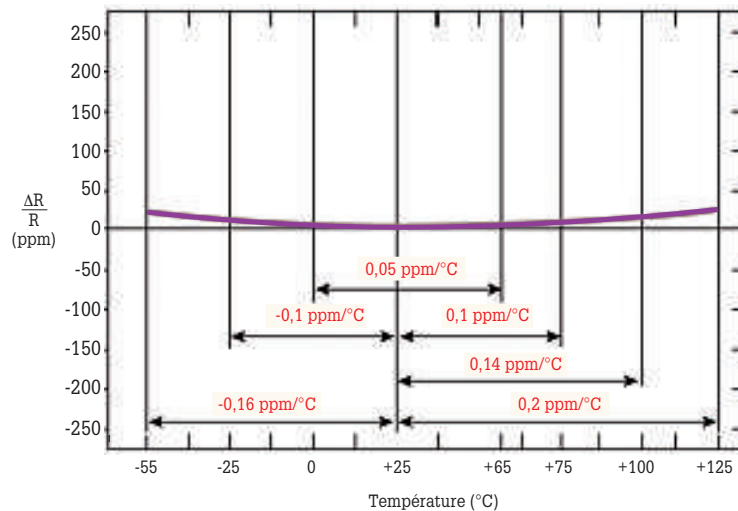
thermique spécifiée pour les applications militaires (voir figure ci-contre).

Lors des diverses manipulations de la température effectuées au cours de la production ou du dopage des matériaux lors du développement de l'élément, la courbe caractéristique du TCR peut être orientée dans le sens des aiguilles d'une montre, ou dans le sens inverse (le point de pivot étant celui de la température de référence de 25 °C). Ce que ne précise pas la fiche technique, c'est que la rotation qui produit un TCR moins élevé sur une plage de températures donnée dégrade également le TCR dans les autres plages. Vous ne devez donc pas vous laisser impressionner par le TCR mesuré dans une gamme étroite, car vous risquez par là même de négliger la détérioration du TCR dans les autres domaines thermiques. A moins que la documentation ne mentionne la courbe TCR complète sur la plage de températures entière, il est impossible de savoir ce qui se trouve entre les deux points d'essai extrêmes, ni sur une plage de températures complète, en dehors de grandeurs mesurées sur une portion restreinte. En clair, il est impératif de déterminer si le TCR des résistances avec lesquelles le projet est conçu est intégralement spécifié pour toutes les gammes de températures. De fait, les fiches techniques qui omettent de délimiter une caractéristique importante doivent être considérées avec circonspection pour toutes les autres caractéristiques. Par ailleurs, l'équilibre en condition de contrainte et de déformation sur l'ensemble de la plage de températures et de puissance peut, sur les résistances de haute précision, dépasser la limite d'élasticité (Loi de Hooke) de l'un des matériaux utilisés et donc, influencer sur la fiabilité et la reproductibilité des critères de performances. Enfin, il est à noter que les fabricants ne précisent jamais si la résistance est composée à partir d'un solide «hookien» ou non.

TCR de résistances appariées en température

Certains circuits exigent des ratios constants entre un certain nombre de résistances, mais pas une stabilité absolue de chaque résistance individuelle. À titre d'exemple, la précision d'un amplificateur opérationnel dépend de l'exactitude et de la stabilité des ratios mesurés en entrée, ainsi que du *feed-back* et des résistances de polarisation. Si tous les composants ohmiques présentent au même moment un ratio constant, la précision de l'ampli opérationnel reste inchangée. Le fabricant de résistances peut donc tester les composants et sélectionner un ensemble qui présente des correspondances de TCR satisfaisantes pour répondre aux exigences de stabilité du ratio sur une plage de températures donnée. Le problème est que cette méthode néglige les divergences entre les valeurs de résistance induites par la puissance au cours de la durée

Caractéristiques de la technologie Z-foil en fonction de la température



Cette figure représente la variation de la résistance par rapport à la courbe de température ambiante et les pentes de TCR à différentes températures ambiantes pour la technologie Z-foil.

de vie. Comme décrit ci-dessus, les valeurs de TCR de toutes les résistances sont mesurées une fois que celles-ci se sont stabilisées à chaque température souhaitée. Les assortiments sont ensuite composés en fonction de la proximité immédiate entre valeurs de TCR. Toutefois, en application réelle, la dissipation en puissance n'est pas toujours identique d'une résistance à l'autre, de même que la température de fonctionnement interne est variable selon le milieu environnant. Les fluctuations du ratio dépendent donc également du TCR absolu de chacun des composants, en plus de leurs TCR appariés. Supposons, par exemple, une application dans laquelle des résistances présentant un TCR absolu (indépendant) de $\pm 10 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ doivent être appariées dans un écart maximal de $2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. Si toutes les résistances subissent une augmentation de 90°C de la température ambiante, on peut s'attendre à une variation de leur ratio égale à $90^\circ\text{C} \times 2 \text{ ppm/}^\circ\text{C} = 180 \text{ ppm}$, soit un taux de $0,018 \%$. Mais si l'une des résistances fonctionne à 100°C , il se produit une erreur supplémentaire égale au TCR absolu de $10 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ que multiplie l'écart de température de 10°C pour une erreur supplémentaire de 100 ppm , soit un écart sur le ratio total de 280 ppm , ou $0,028 \%$, ce qui est un taux d'erreur beaucoup trop élevé pour n'importe quelle application de précision.

L'utilisation, dans la même application, d'une série de résistances de type «Z-1 Foil Bulk Metal Foil» ayant un TCR suivi de $\pm 0,2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ permettrait d'obtenir une correspondance de ratio plus étroite à ces températures. Ainsi, une résistance de TCR égal à $+0,2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ à 90°C produirait une variation de $+18 \text{ ppm}$ ($+0,0018 \%$), une autre de TCR égal à $-0,2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ à 100°C entraînerait un écart de

-20 ppm ($-0,0020 \%$), soit une variation de ratio totale de 38 ppm ($0,0038 \%$) pour la technologie Z-Foil, contre $0,028 \%$ pour l'exemple utilisant des résistances à couches minces. On constate donc que l'erreur de TCR obtenue sur un ensemble apparié à couches minces dépasse de plus de sept fois l'écart mesuré sur un lot de résistances à feuilles non appariées dont le TCR est intrinsèquement faible. En outre, les résistances à faible TCR inhérent permettent un excellent suivi du TCR même lorsque les composants sont installés sur des circuits, dans des équipements ou dans des lieux différents.

Pour toutes les applications de haute précision dans lesquelles les résistances peuvent être amenées à fonctionner à des températures internes variables, il est essentiel que les composants présentent des valeurs de TCR absolues très faibles, et non uniquement une proximité entre les coefficients appariés (ou TCR relatifs). Là encore, vous devez connaître le détail de toutes les caractéristiques, au-delà des spécifications annoncées, c'est-à-dire, dans le cas présent, le TCR absolu, ainsi que la correspondance ou le TCR apparié. Enfin, il ne faut pas non plus oublier la règle de base qui prévaut dans l'industrie, à savoir que le TCR absolu de chaque résistance ne doit pas être plus de trois fois supérieur à la sensibilité de l'ensemble.

Enfin, il faut savoir que bon nombre de fabricants fournissent des échantillons qui permettent de soumettre les résistances à un essai avant engagement. On ne saurait trop vous conseiller d'exploiter au maximum cette possibilité. Car rien ne vaut un test des composants dans l'environnement d'utilisation et en vous assurant d'utiliser l'appareillage approprié. ■