

September 9/2023 Jg. 27

PC & Industrie

Fachzeitschrift für industrielle Automatisierung

**Widerstände für Energie, Transport und
Hochtemperaturanwendungen**

Höchste Präzision

WDI AG, Seite 103

wdi ag

SONDERTEIL

**EINKAUFSFÜHRER
ELEKTRONIK KOMPONENTEN**

ab Seite 35

Höchste Präzision

Widerstände für Energie, Transport und Hochtemperaturanwendungen



Bulk Metal Foil-Widerstandstechnologien mit Blick darauf, wie sich diese in Bezug auf extreme Temperaturen und andere Umweltfaktoren wie Feuchtigkeitseintritt, Stöße und Vibrationen, niedrige Temperaturen, intermittierende Stromstöße, elektromagnetische Störungen, Schaltimpulse und elektrostatische Entladung entwickelt haben.

Präzisionsgrad

Der Präzisionsgrad von Widerständen ist das Ausmaß, in dem sie ihren ursprünglichen Wert unter diesen anwendungsbezogenen Stressfaktoren beibehalten. Das Streben nach neuen Technologien zur Verbesserung der Effizienz in der Energiewirtschaft bietet den Herstellern von Widerständen weiterhin neue Möglichkeiten. Auf dem Erdölmarkt sind Präzisionswiderstände in hochentwickelten seismografischen Instrumenten zu finden, die bei der Erdölsuche und in Ölpipelines eingesetzt werden, sowie in computergestützten Prozesssteuerungsinstrumenten, die weltweit in Erdölraffinerien und Chemieanlagen eingesetzt werden.

Ein Anwendungsbeispiel

Eine typische kommerzielle Anwendung für Präzisionswiderstände ist z. B. die seismische Erkundung von Erdöl und die Datenerfassung in Bohrlöchern mit hoher Strahlung und hohen Temperaturen. In der seismischen Ölexploration müssen Widerstände in analogen Schaltungen nicht nur robust sein, sondern auch schnell ansprechen und ausgezeichnete thermische Stabilisierungseigenschaften aufweisen, um sicherzustellen, dass keine Impulse verpasst werden. Sie dürfen nicht empfindlich auf Temperaturschwankungen reagieren und müssen einander exakt folgen, damit die Verstärkungseinstellungen und -verhältnisse vorhersehbar und über die Zeit reproduzierbar sind. Die Widerstände müssen außerdem ein sehr geringes Stromrauschen aufweisen, um zu vermeiden, dass seismisch erzeugte Signale, die von Diskontinuitäten in tiefen Erdschichten, in denen sich Erdöl befinden könnte,

Die Stabilität eines Präzisionswiderstands hängt in erster Linie von seiner Temperatur ab, und die Temperatur kann die Widerstandstabilität auf viele verschiedene Arten beeinflussen. Die thermisch bedingten Auswirkungen auf die Stabilität haben verschiedene unmittelbare, kurzfristige und langfristige Folgen, von denen einige reversibel sind und andere nicht.

Die unmittelbarste Auswirkung eines Temperaturanstiegs ist der Selbsterhitzungseffekt oder Leistungskoeffizient des Widerstands (PCR), der sich als Widerstandsänderung bemerkbar macht, sobald sich der Widerstand aufgrund der Verlustleistung erwärmt. Der zweite Effekt ist die Veränderung des Widerstands, wenn sich seine Körpertemperatur aufgrund von Temperaturänderungen in seiner Umgebung ändert.

Beide Veränderungen sind Funktionen des dem Widerstand innewohnenden Temperaturkoeffizienten des Widerstands (TCR), der auf die Körpertemperatur des Widerstands reagiert, und beide sind unabhängig voneinander und schrittweise reversibel, wenn der Leistungspegel oder die Umgebungstemperatur geändert wird.

Die Unterschiede zwischen den Auswirkungen von TCR und PCR

sind gering, aber bei TCRs im sehr niedrigen ppm/°C-Bereich lohnt es sich, sie voneinander zu unterscheiden, damit Entwicklungsingenieure in der Lage sind, die Schaltkreisstabilität in den anspruchsvollsten Anwendungen so weit wie möglich zu kontrollieren.

Die Temperatur wirkt sich auch auf die langfristige Betriebsstabilität bzw. Lebensdauer des Widerstands aus. Dabei handelt es sich um eine permanente Veränderung des Widerstands, die manchmal so groß ist, dass sie zum vollständigen Ausfall des Widerstands führt.

Auswahl des optimalen Widerstandes

In diesem Artikel befassen wir uns speziell mit den Auswirkungen der Temperatur auf Präzisionswiderstände und mit den Entscheidungen, die Konstrukteure bei der Auswahl des besten Präzisionswiderstands für Hochtemperatur-, Energie- und Transportanwendungen treffen müssen. Dickschicht-Widerstandstechnologien sind zwar weit verbreitet und kostengünstig, werden aber im Allgemeinen für handelsübliche Anwendungen eingesetzt und kommen für Präzisionsanwendungen nicht in Frage. Daher vergleichen wir in diesem Artikel nur Drahtwickel-, Dünnschicht- und



Autor:
Falko Ladiges
Teamleader PEMCO
WDI AG
www.wdi.ag

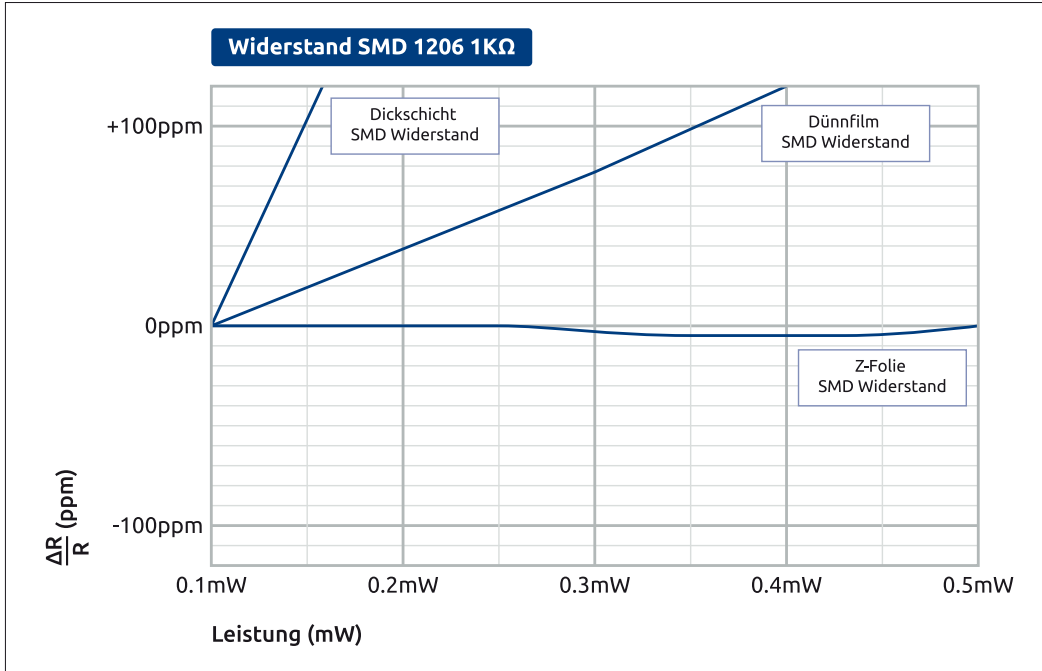


Bild 1: Verhalten von drei verschiedenen Widerstandstechnologien bei angelegter Leistung (Leistungskoeffiziententest)

reflektiert werden, „maskiert“ werden. Die Verstärkermodule müssen aufeinander abgestimmt sein, da möglicherweise viele Signaleingangskanäle in Betrieb sind. Daher muss die Phasenverschiebung zwischen allen Verstärkern extrem eng sein. Diese Anforderungen und insbesondere die TCR-Nachführung sind unabdingbar, wenn die aus verschiedenen Teilen der Welt gesammelten Informationen später sinnvoll verglichen werden sollen.

wirksam bei der Verringerung der Induktivität, und Drahtwicklungen bleiben die Widerstände mit der größten Reaktanz und der größten Phasenverschiebung.

Interne Verbindungen

Die internen Verbindungen von drahtgewickelten Widerständen sind ebenfalls problematisch. Lötzinn ist für die Verbindungen zwischen dem Feindraht-Widerstands-

element und den großen äußeren Anschlüssen unerwünscht, und das direkte Schweißen des Feindrahts an die großen Anschlüsse ist im Allgemeinen unzuverlässig. Daher wird der Draht fast immer über eine Übergangsmetalllasche mit den Anschlüssen verbunden. Die prozesskompatiblen Metalle, die für die Laschen zur Verfügung stehen, führen zu einer thermischen EMK an den Verbindungsstellen, so dass die

Drahtwicklungen unter den Präzisionswiderständen eine relativ hohe thermische EMK aufweisen. Das Wickeln des Drahtes erfordert eine Spannung, um den Draht an seinem Platz zu halten, aber dies beinhaltet Spannungen, die sich während der Lebensdauer ändern, was wiederum langfristige Widerstandsänderungen verursacht. Höhere Temperaturen führen zu noch größeren Widerstandsänderungen während der Lebensdauer des Geräts. Zu ihren Gunsten bieten drahtgewickelte Widerstände engere Toleranzen und eine größere Stabilität als Dünnschicht-Bauelemente, aber ihr Gewicht und ihre Masse schränken ihre Anwendungen in der Elektronik mit hoher Dichte ein.

Dünnschichtwiderstände

werden durch Sublimation von Metallschichten auf Substrate hergestellt, wobei Verdampfungs- oder Sputterverfahren eingesetzt werden, um Schichten von Metallschichten aufzubauen. Der Film ist dann eine Anhäufung von Metallpartikeln, die keine unabhängige monolithische Struktur neben dem Substrat aufweisen. Dünnschichtwiderstände können in kleineren Gehäusen eine höhere Dichte erreichen als drahtgewickelte Widerstände, da sie aus Materialien mit höherem Widerstand hergestellt werden können, die in feine Mustergeometrien geätzt oder gelasert werden.

Einteilung der Drahtwiderstände

Drahtwiderstände können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Leistungsdrahtwiderstände mit hoher Leistung und geringer Präzision und Präzisionsdrahtwiderstände mit geringer Leistung und hoher Präzision. Für unsere Zwecke ist nur die zweite Kategorie von Interesse. Präzisionsdrahtwicklungen werden aus ausgewähltem Draht hergestellt, der um eine Spule gewickelt, mäßig spannungsarm gemacht, nach Toleranz kalibriert und mit Epoxidharz vergossen oder hermetisch versiegelt wird. Die Spule ist der Länge nach geteilt, so dass Abschnitte, so genannte Pi-Abschnitte, in entgegengesetzter Richtung gewickelt werden können, um die Induktivität zu verringern. Doch selbst die besten Fertigungstechniken sind nur mäßig

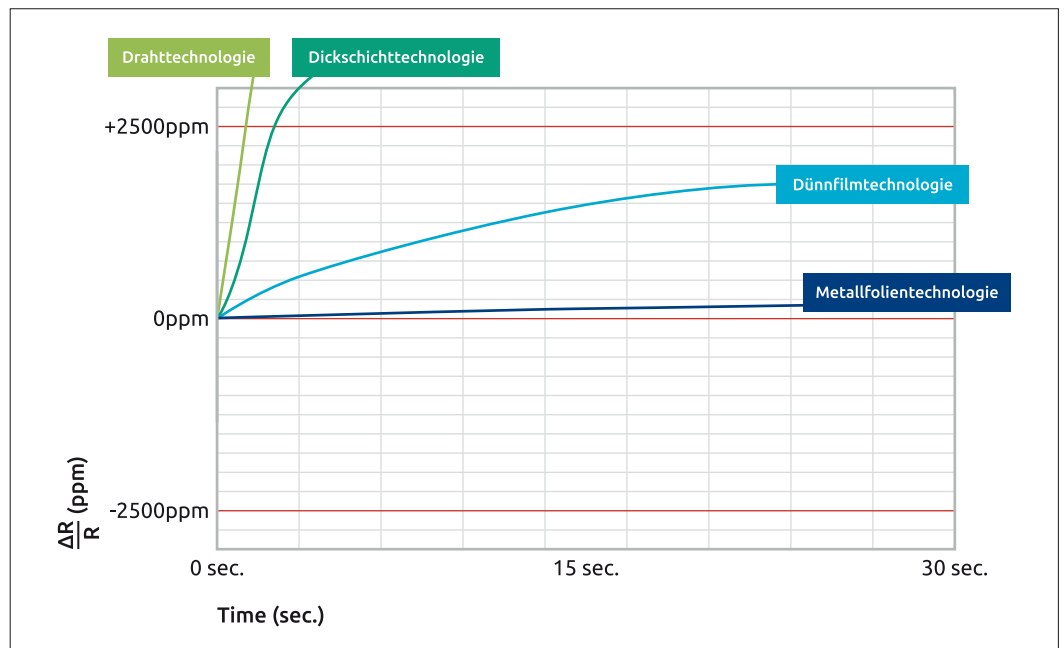


Bild 2: Demonstration der thermischen Stabilisierung (1 W an 50 mΩ SMD 2512 - Current Sense)

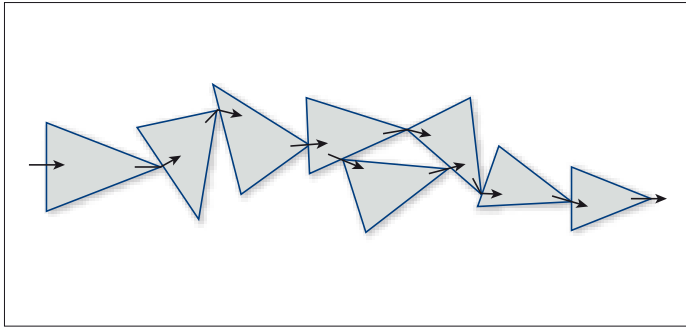


Bild 3a: Die Geräuscentwicklung ist am größten, wenn der Strom durch Punkt-zu-Punkt-Kontakte fließt, wie in einer Partikel-Matrix dargestellt

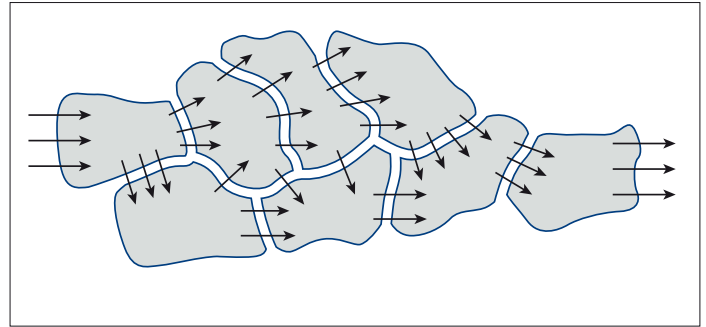


Bild 3b: Die Rauscentwicklung ist minimal, wenn der Strom über mehrere Pfade fließt, wie es bei einer Metallfolien-Widerstandslegung der Fall ist

Der höhere Widerstand ergibt sich in erster Linie aus der viel kleineren Querschnittsfläche des sehr dünnen Widerstandsgitters der Dünnschicht, typischerweise 1 Quadratmikron, im Vergleich zum feinsten verwendbaren Draht, der mit 314 Quadratmikron die kleinste verwendbare Querschnittsfläche hat.

Dünnschichtwiderstände können auch in flachen Substratnetzwerken oder kompakten Widerstandschip-Konfigurationen hergestellt werden, was bei Drahtwicklungen nicht möglich ist. Sie haben auch einen geringeren Blindwiderstand als Drahtwicklungen und sind für Schaltungen mit höheren Frequenzen besser geeignet als Drahtwicklungen. Sie sind in der Regel auch preiswerter als Drahtwicklungen.

Der Vorteil von Drahtwicklungen gegenüber Dünnschichten ist ihr niedrigerer TCR-Wert und ihre bessere Langzeitstabilität. Die typische parabolische TCR-Kurve eines Dünnschichtwiderstands kann manchmal in den warmen Temperaturbereichen über 25 °C in eine waagrechtete Richtung gedreht werden, aber der gleichzeitige negative Effekt ist eine Verschlechterung des TCR in den Temperaturbereichen unter 25 °C. Dünnschichtwiderstände haben ein größeres Stromrauschen als drahtgewickelte Widerstände und weisen sowohl beim TCR als auch bei der Langzeitstabilität erheblich mehr Verschiebungen bei hohen Temperaturen auf als andere Präzisionswiderstandstechnologien.

Rauscentwicklung

Metallfolienwiderstand im Vergleich zu anderen Technologien: Die Bilder 3 a und b zeigen die Rauscentwicklung.

In der Vergangenheit versuchten die Entwicklungsingenieure von

Widerständen, die Leistung von Widerständen zu verbessern, indem sie die inneren Spannungen in den Bauteilen verringerten. Bei drahtgewickelten Präzisionswiderständen wurden beispielsweise verschiedene Methoden ausprobiert, um den Draht mit einer ausreichenden Wickelspannung zu wickeln, um ihn an Ort und Stelle zu halten und dann die Spannungen auf dem Draht zu verringern, sobald er auf einer Spule geformt war. Dies war zum Zeitpunkt der Herstellung schwierig genug zu bewerkstelligen, aber das Verfahren konnte nicht verhindern, dass die Spannungen den Widerstandswert nach dem Erhitzen und dem Durchlaufen tatsächlicher Anwendungen in Schaltkreisen veränderten.

Abschirmung oder Verkapselung

Bei Dünnschichtwiderständen gibt es diese Möglichkeit nicht, da die Dünnschicht direkt auf das Substrat gesputtert oder abgeschieden werden muss, um eine neue Widerstandsanhäufung zu bilden. Ingenieure, die Dünnschichtwiderstände herstellen, hatten also zwei Möglichkeiten: die Leistung durch Abschirmung zu verbessern oder die Schicht durch Beschichtungen und Verkapselungen zusätzlich zu schützen.

Folientechnologie

Die Folienwiderstandstechnologie vermeidet viele dieser Probleme, indem sie die Spannungen so steuert, dass sie Kräfte mit gegensätzlichen Wirkungen ausgleicht und diese Spannungen zur Herstellung eines extrem stabilen Widerstands nutzt. Anstatt einen möglichst niedrigen TCR anzustreben, geht die Folientechnologie von einer Folie

aus, die den stabilsten TCR über einen möglichst großen Temperaturbereich aufweist. Dieser TCR wird in einer relativ dicken, kaltgewalzten Speziallegierung erreicht, die die gleiche Molekularstruktur aufweist wie die Rohlegierung, aus der sie hergestellt wird.

Dadurch wirkt die Folie wie eine monolithische Struktur mit einem festen und bekannten linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten (LCThE) über alle Temperaturbereiche, denen der Widerstand während seiner Lebensdauer ausgesetzt sein könnte. Das zweitwichtigste Element der Konstruktion ist der Klebstoff, der die Folienlegierung auf dem flachen Keramiksubstrat hält und dabei hohen Temperaturen und anderen Phänomenen wie pulsierender Stromstärke, Feuchtigkeitseintritt, Stößen und Vibrationen, niedrigen und hohen Temperaturen sowie elektrostatischen Entladungen (ESD) standhält, während er das Folienelement sicher auf dem Substrat hält.

Perfekt ausbalancierte Dualität

Diese Eigenschaften machen den wesentlichen Spannungsausgleich aus, der die Folientechnologie ausmacht. Mit steigender Temperatur erhöht sich der Widerstand der unverbundenen Folie (positiver TCR). Gleichzeitig erfährt die Folie eine Druckkraft, weil ihr höherer LCThE sie gegen die Rückhaltekraft des Substrats drückt. Durch diese Druckkraft sinkt der Widerstand. Bei einem Temperaturanstieg bewirkt diese perfekt ausbalancierte Dualität eine Verringerung des Widerstands (die Druckkraft) um genau den gleichen Betrag wie die inhärente Erhöhung des Widerstands (der positive TCR der unge-

bundenen Folie), was zu einem TCR des fertigen Widerstands von nahezu Null führt. Dies führt zu Folienwiderständen mit einem TCR-Wert von weniger als 1 ppm/°C.

Technologische Innovationen

Die flache, planare Struktur des Folienwiderstands mit dem Widerstandselement an der Oberfläche (vor der Beschichtung oder Verkapselung) eignet sich für ein einzigartiges Verfahren zum Trimmen von Widerständen auf den Wert, um Hotspots und komprimierte Stromdichte dort zu vermeiden, wo das Widerstandsgitter seine Richtung ändert. In hermetisch verschlossenen Gehäusen können Toleranzen von bis zu 0,001 % erreicht werden. Das Folienwiderstandselement ist mit einem fotogätzten Gitter versehen, das geometrisch proportionierte, aufeinanderfolgende Verbindungen enthält, die entfernt werden können, während der Widerstand schrittweise in immer kleineren Mengen erhöht wird, ohne dass es zu übermäßigem Rauschen oder zufällig verteilter Stromdichtekompression (Hot Spots) kommt. Das Gitter ist außerdem so konzipiert, dass die Ströme in den benachbarten Pfaden entgegengesetzt sind, um sowohl die Induktivität als auch die Kapazität zu minimieren und so eine hohe Geschwindigkeit zu erreichen. Unter Verwendung dieser grundlegenden technologischen Innovationen kann der Widerstand in vielen verschiedenen Konfigurationen hergestellt werden, darunter Leistungswiderstände, Strommesswiderstände, hermetisch abgedichtete Messwiderstände, oberflächenmontierbare Chipwiderstände mit spannungsisolierenden, flexiblen

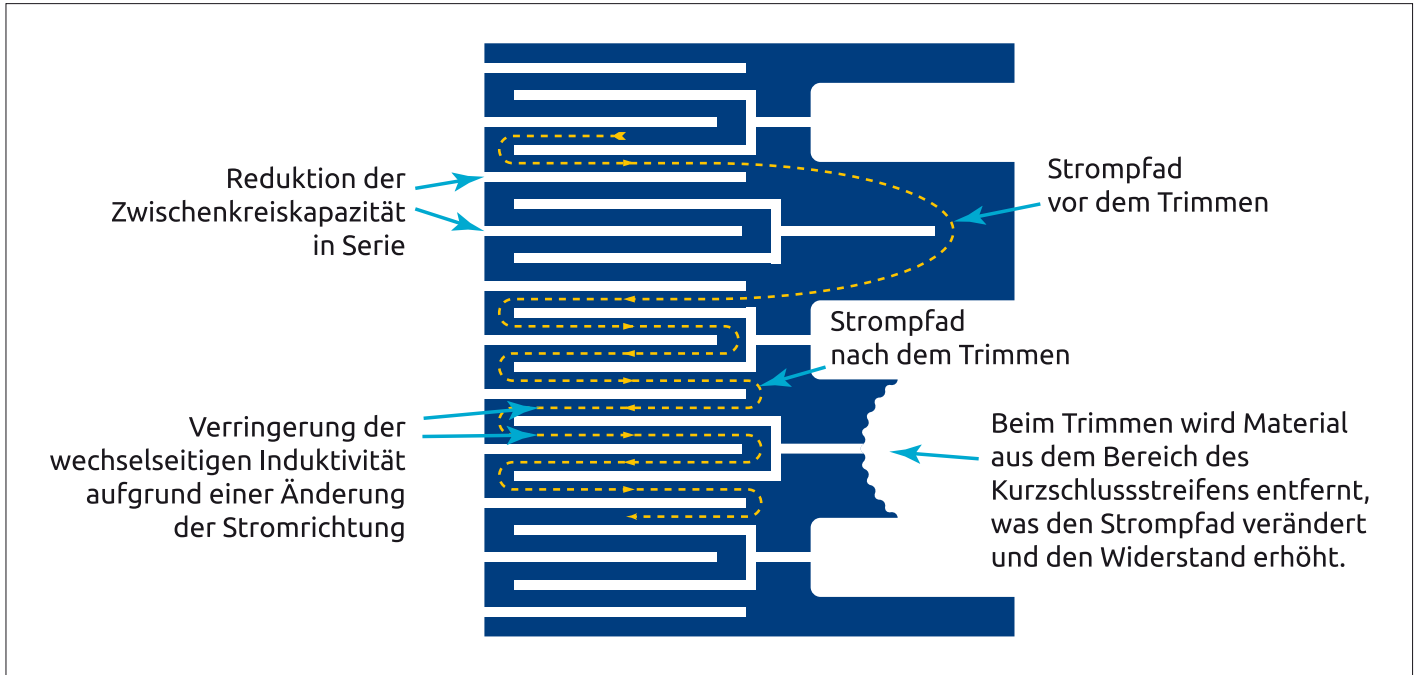


Bild 4: Trimmen auf Werte (konzeptionelle Illustration).

Anschlüssen und vieles mehr für Anwendungen in der Raum- und Luftfahrt, medizinischen Geräten, Prozesssteuerungen oder überall dort, wo hochpräzise Widerstände, Netzwerke und Trimpotentiometer unter extremen Temperaturbedingungen arbeiten müssen.

Bild 4 zeigt das Trimmen auf bestimmte Werte (konzeptionelle Illustration): Um einen präzisen Widerstandswert zu erhalten, wird der Metallfolienchip durch selektives Entfernen eingebauter „Verkürzungsstege“ getrimmt. Um den Widerstand in bestimmten Schritten zu erhöhen, werden markierte Bereiche ausgeschnitten, wodurch sich der Widerstand schrittweise annähert. Diese Methode reduziert den Effekt von „Hot Spots“ und verbessert die Langzeitstabilität der Metallfolienchips.

Z1-Folienwiderstände

Die neuen Z1-Foil Bulk Metal Foil-Widerstände gewährleisten einen nahezu rauschfreien Betrieb bei der seismischen Erdölexploration und der Datenerfassung von Ölbohrungen. Sie bieten ein vorhersehbares Ansprechverhalten und eine sehr präzise Nachführung von Verstärkern innerhalb eines einzelnen Systems oder zwischen mehreren miteinander verbundenen Systemen. Wenn Widerstände wie diese einen TCR-Wert von nahezu Null

haben, bedeutet dies, dass Widerstände in verschiedenen Schaltkreisen bei unterschiedlichen Temperaturen in verschiedenen Geräten konsistente Beziehungen aufrechterhalten, selbst wenn sie räumlich getrennt sind.

Stabilitätsstandards werden übertroffen

Z1-Folienwiderstände, der neueste Stand der Technik in der Folienwiderstandstechnologie, übertreffen alle bisherigen Stabilitätsstandards für Präzisionswiderstände mit einer Verbesserung in der Größenordnung von Temperaturstabilität, Lebensdauerstabilität und Feuchtigkeitsbeständigkeit, die in unserem unberechenbaren globalen Klima immer wichtiger werden - ganz gleich, ob sie in der Hitze des Dschungels mit hoher Luftfeuchtigkeit arbeiten, in der trockenen, kalten Umgebung der Arktis oder in einem Kampfjet, wo sie den Erschütterungen und Vibrationen des Starts und einem Temperaturwechsel von +49 °C (+120 °F) auf dem Wüstenboden auf -48 °C (-55 °F) in Reiseflughöhe in weniger als einer Minute ausgesetzt sind, ohne dass sich ihr Widerstand ändert. Diese neuen Leistungsmaßstäbe geben Entwicklungingenieuren die Möglichkeit, analoge Schaltungen zu entwickeln, die bisher nicht möglich waren, und gleichzeitig die Kosten für die kri-

tischsten Schaltungen zu senken, indem sie den Bedarf an Korrekturschaltungen eliminieren, die nur zur Stabilisierung oder Iteration der Genauigkeit in aufeinanderfolgenden Phasen des Schaltungspfades verwendet werden.

Neue, vierte Generation der Folientechnologie

Vor der Z1-Folientechnologie wurden Hochfrequenz-Präzisionsanwendungen nur von Präzisions-Dünnschichtwiderständen bedient, aber diese Bauelemente sind nicht so genau oder so stabil wie drahtgewickelte Widerstände, die kein gutes Hochfrequenzverhalten aufweisen. Diese neue, vierte Generation der Folientechnologie bietet Entwicklern Widerstandskomponenten, die eine noch höhere Präzision als Drahtwiderstände bieten und gleichzeitig gut für Hochfrequenz- und Hochtemperaturanwendungen geeignet sind. Die Folie ermöglicht außerdem eine erhebliche Größenreduzierung. Jetzt können Bulk Metal-Folienwiderstände in Größen von nur 0603 als On-Board-Sekundärstandards überall dort eingesetzt werden, wo die Geräte eingesetzt werden - sogar im Weltraum. Die neuen Z1-Foil FRSH-, HTHG- und HTHA-Serien oberflächenmontierter Chipwiderstände sind ein Beispiel für diese innovative neue Technologie, die

Temperaturen von bis zu 240 °C standhalten kann, während die neue FRSM-Serie für höchste Präzision und Stabilität steht.

Fazit

Die Verkleinerung der Schaltungsfläche bringt neue Herausforderungen für das Design mit sich, die mit dem Wärmemanagement und seinen unbeabsichtigten Folgen sowie in einigen Fällen mit einer größeren Empfindlichkeit gegenüber ESD zusammenhängen. Ein solches Problem ist die thermische elektromotorische Kraft (ThEMF), die überall dort Fehler Spannungen erzeugt, wo Temperaturunterschiede zwischen zwei Verbindungen aus zwei unterschiedlichen Metallen bestehen, z. B. wenn interne Widerstandselemente mit den externen Anschlüssen eines Widerstands verbunden sind. Temperaturunterschiede entstehen an einem Widerstand durch ungleichmäßige interne Verlustleistung, durch von wärmeabstrahlenden Bauteilen erwärmte Anschlüsse und durch Wärmeableitungspfade, die entlang der Leiterplatte sowohl in den Leiterbahnen als auch im Grundplattenmaterial selbst verlaufen. Die für ihren angeborenen TCR und ihre LCThE entwickelte Folie hat auch eine sehr niedrige thermische EMF im Vergleich zu Kupfer von nur 0,05 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. ◀