

Die Wahrheit ist zwischen den Zeilen zu finden

Datenblätter von Widerständen richtig lesen

Datenblätter von Widerständen enthalten eine Fülle von Informationen, die nicht immer vollständig sind. Auch wenn die Daten auf der ersten Seite absichtlich sehr ansprechend gestaltet sind, sollten Sie sich nicht darauf verlassen, ohne den Rest des Datenblatts zu lesen und zu verstehen. Worauf Entwickler achten sollten.

VON FALKO LADIGES, LEITUNG
PRODUKTMARKETING PEMCO BEI WDI,
UND YUVAL HERNIK, BEREICH DIGITAL
COMMUNICATIONS BEI DER
VISHAY PRECISION GROUP

Eigentlich sollten viele Datenblätter mit einem Warnhinweis versehen sein: Achtung, Begriffe wie »Toleranz« und »TCR« werden hier unpräzise verwendet! Ingenieure brauchen eine gesunde Skepsis, die es ihnen ermöglicht, unvollständige und irreführende Spezifikationen zu entschlüsseln. Eine Skepsis, die etwa vor allem dann wichtig ist, wenn man sich bewusst ist, dass es immer mehr gefälschte »Präzisions«-Widerstände gibt, die von skrupellosen Anbietern auf dem Papier mit überflüssigen Angaben getarnt werden. Auf diese Weise entstehen etwa Datenblätter mit überflüssigem Text, Zahlen, Marketingfloskeln und Halbwahrheiten in Bezug auf die Spezifikationen. Das Problem ist nicht unbedingt, dass die Daten zurückgehalten werden, sondern dass sie auf ver-

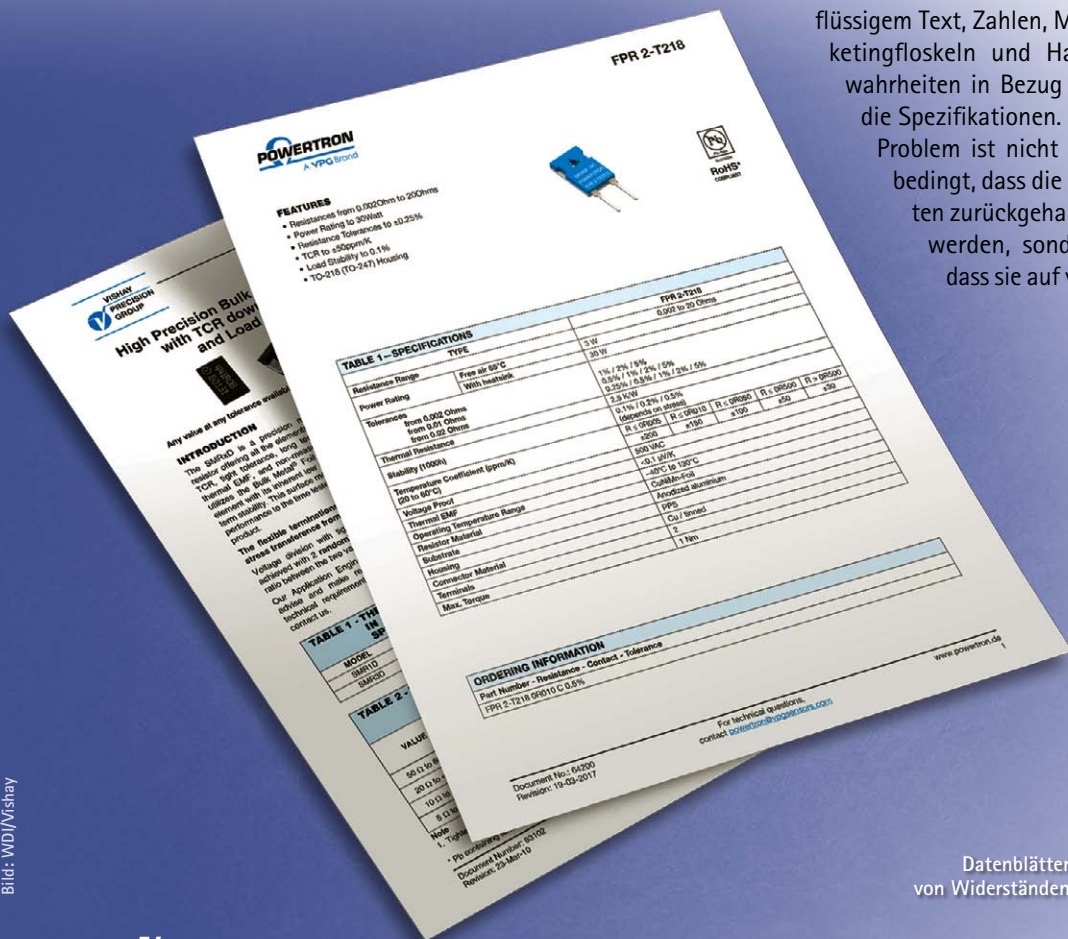
wirrende Weise vermischt werden – wie überall im Leben steckt auch hier der Teufel im Detail.

Entwicklungsingenieure stehen unter großem Druck, die Informationen in Datenblättern schnell zu verarbeiten. Dieser Artikel bietet daher eine Strategie an, mit der Entwickler innerhalb weniger Minuten die Grundlagen in einem Datenblatt für Präzisionswiderstände finden. Zu dieser Strategie gehören Schlüsselbegriffe, die in diesen Dokumenten auftauchen, und ihre Bedeutung.

Toleranz

Toleranz hat viele Bedeutungen, die von der Einkaufstoleranz (Anfangstoleranz) bis zur Endtoleranz (Gesamtfehlerbudget) reichen. Das Letzte, das Sie bei der Auswahl von Komponenten wissen müssen, ist die Anfangstoleranz des Teils. Am wichtigsten ist vielmehr die erforderliche End-of-Life-Toleranz des Gerätes. Alle Komponenten sollten im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen nach allen Belastungen und Beanspruchungen, denen sie während der geplanten Lebensdauer der Anlage ausgesetzt sein könnten, bewertet werden.

Jeder Komponente ist ein Fehlerbudget zuzuweisen, bei dessen Überschreitung das Gerät aus seiner Spezifikation herausfällt oder möglicherweise komplett ausfällt. Neben der Anfangstoleranz umfasst das Fehlerbudget auch die zulässigen Verschiebungen durch Haltbarkeit, Montage, TCR, Stöße, Vibrationen, Feuchtigkeit, Temperaturschock, thermische EMF, Last-Lebensdauer-Drift, ESD, Strahlung und harmonische Verzerrung (die harmonische Verzerrung ist ein Maß für die Konformität eines



Datenblätter von Widerständen

Bauteils mit dem ohmschen Gesetz als Vorhersage für die Zuverlässigkeit).

Ein Ansatz könnte dann sein, eine bestimmte Widerstandstechnologie mit der geringsten Veränderung durch alle Belastungen auszuwählen, alle erwarteten ΔR s zu addieren und diese von der Toleranzgrenze am Ende der Lebensdauer abziehen, um die Einkaufstoleranz zu erhalten. Die Stückliste spezifiziert dann das Widerstandsmodell nach Widerstand, Toleranz und möglicherweise nach TCR (normalerweise typisch oder auf einen engen Temperaturbereich beschränkt). Obwohl in der Stückliste nicht angegeben, ist jeder Delta-R-Grenzwert für die angegebene Widerstandstechnologie für die Anwendung entscheidend. Aus diesem Grund sind Präzisionswiderstände mit demselben Widerstand, derselben Toleranz und demselben TCR, aber mit unterschiedlichen Technologien nicht austauschbar, weil ihre Veränderungen während der Lebensdauer nicht gleich sind. Eine Substitution allein auf der Grundlage dieser Faktoren könnte die Eigenschaften und den Erfolg der gesamten Anwendung gefährden. Nur der OEM-Ingenieur, der die Fehlerbudgetanalyse durchgeführt hat, kann einen geeigneten Ersatz bestimmen. Manche Elektronikhersteller ersetzen Präzisionswiderstände durch billigere Produkte und gefährden damit die Systemleistung erheblich.

Um als Ersatzstoff überhaupt infrage zu kommen, sind alle Leistungsmerkmale bei allen Beanspruchungen und Belastungen vollständig und genau zu definieren, um sicherzustellen, dass alle Anforderungen erfüllt werden.

Insbesondere bei hochpräzisen Schaltungen, die Widerstände mit hoher Zuverlässigkeit und engen Toleranzen verwenden, reicht es nicht aus, wenn der Hersteller die Widerstände vor der Auslieferung misst. Seine Geräte müssen kalibriert und z. B. auf das National Institute of Standards and Technology (NIST) rückführbar sein. Außerdem müssen die Messungen ein Schutzband aufweisen, das den Messfehler auf die angegebene Toleranz begrenzt und auf 100 Prozent der Widerstände anwendbar ist.

Außerdem muss der Gerätehersteller die Gewissheit haben, dass die Widerstände beim Empfang innerhalb der Toleranz liegen – und nicht nur so lange in eine gemessene Toleranz »hineingeschliffen« werden, bis sie als versandfähig eingestuft werden (aber nicht lange danach). Leider sind die Eingangsprüfungen vieler OEMs nicht ausreichend kalibriert, um Widerstände mit engen Toleranzen zu messen, sodass sie sich auf die Ehrlichkeit der Lieferanten verlassen müssen. Darüber hinaus haben

einige Unternehmen Komponenten gekauft, die direkt an die Produktion geliefert wurden, sodass die Eingangskontrolle vollständig umgangen wurde. Wenn die Anwendung wichtig ist, muss der Lieferant deshalb für Qualifikationsprüfungen und regelmäßige Q.A.-Audits zugänglich sein.

Auch muss der Endkunde beurteilen, ob eine von einem Hersteller angebotene Toleranz wirklich praktikabel ist. Beispielsweise werden einige oberflächenmontierte Dünnfilm-Chipwiderstände mit sehr engen Toleranzen für sehr niedrige Widerstandswerte angeboten. Auf dem Datenblatt mag das beeindruckend erscheinen, es ist aber nicht mit den Montageprozessen kompatibel. Wenn diese Widerstände auf der Platine montiert werden, kommt es durch die Lötwärme häufig zu einer Widerstandsänderung. So schmelzen die Lötanschlüsse, fließen und verfestigen sich wieder mit veränderten Widerstandswerten. Bei Widerständen mit niedrigem Wert ist die Widerstandsänderung viel größer als die angegebene Toleranz. Nachdem der Kunde einen hohen Preis für eine unpraktisch enge Toleranz bezahlt hat, hat er am Ende Widerstände mit einer geringeren Toleranz, wenn sie auf der Leiterplatte montiert sind.

Temperaturkoeffizient des Widerstands (TCR)

Einen Bereich von besonderem Interesse stellt der Temperaturkoeffizient dar, da er oft falsch dargestellt oder unvollständig definiert wird. Außerdem ist er ein Merkmal, das das Verhalten von Schaltungen vom ersten Tag an beeinflusst. So wird der TCR häufig als Indikator für die Gesamteigenschaften eines Widerstands verwendet. Man geht davon aus, dass ein Widerstand umso präziser ist, je niedriger der TCR-Wert ist, was im Allgemeinen auch zutrifft. Wenn also der TCR nicht vollständig und genau definiert ist, ist diese Annahme ungültig, und die Verwendung des Widerstands macht alle vom Entwickler vorgenommenen Bewertungen der Genauigkeit, Stabilität und Zuverlässigkeit ungültig.

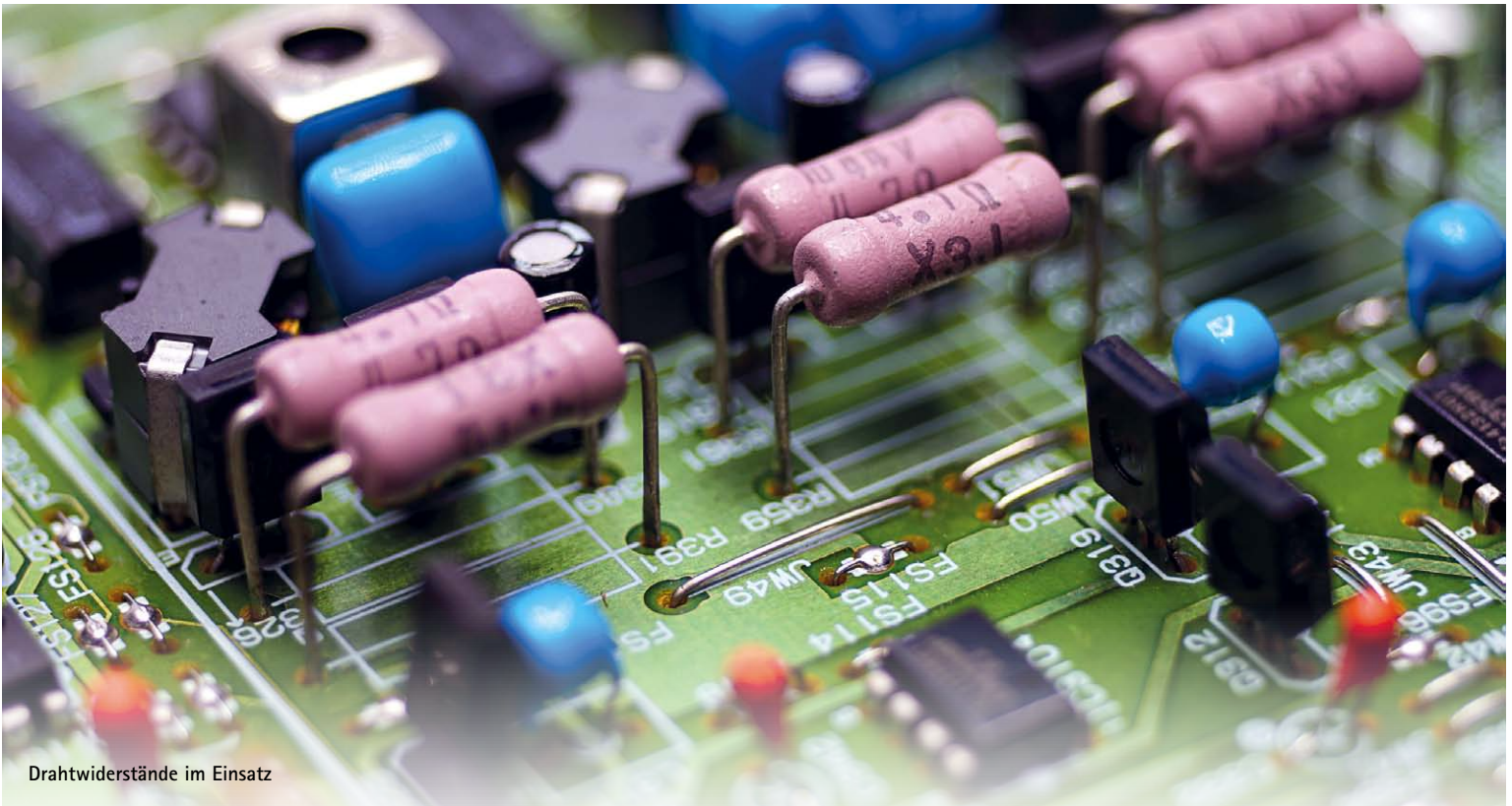
In Datenblättern angegebene TCR-Werte stammen aus Widerstandsmessungen, die vorgenommen wurden, nachdem sich die Widerstände bei einer bestimmten Temperatur stabilisiert haben. Diese Grenzen eines bestimmten Temperaturbereichs werden in der Regel für 30 Minuten bei jeder Temperatur definiert. Im tatsächlichen Betrieb haben Widerstände mit unterschiedlichen physikalischen Körpern unterschiedliche thermische Reaktionszeiten,

und im Gegensatz zu den Messbedingungen können die Widerstände in der Schaltung alle bei unterschiedlichen Temperaturen zueinander und zur Umgebungstemperatur arbeiten. Unterschiedliche Betriebszustände, unterschiedliche Abstände zu anderen Komponenten und andere Umgebungsfaktoren führen dazu, dass die Widerstände bei unterschiedlichen Temperaturen arbeiten.

Industrieprotokolle schreiben Standardmessverfahren vor. Typischerweise werden dabei Widerstandsmessungen bei einer Referenztemperatur, einer niedrigeren und einer höheren Temperatur durchgeführt. Der TCR ist definiert als $\Delta R/R_{ref}$ im kalten Bereich und $\Delta R/R_{ref}$ im heißen Bereich. Für Anwendungen im militärischen Bereich wären dies 25 °C bis -55 °C beziehungsweise +125 °C. Der als $\Delta R/R$ gegen ΔT definierte TCR, der auf nur zwei Messungen (+25 °C bis -55 °C beziehungsweise +25 °C bis +125 °C) basiert, geht von einem linearen TCR aus, obwohl $\Delta R/R = f(T)$ eine Parabel ist. Die charakteristische TCR-Kurve scheint nur deshalb linear zu sein, weil sie auf je zwei Messungen im heißen und im kalten Bereich beruht und zwei Punkte immer eine Gerade definieren, auch wenn sie eigentlich auf einer Kurve liegen. Tatsächlich könnte der momentane TCR zwischen diesen beiden Endpunkten der Temperaturmessung viel höher sein. Gehen Sie also nie davon aus, dass der TCR über verschiedene Temperaturbereiche hinweg gleich ist, es sei denn, Sie verwenden die Bulk-Metal-Foil-Technologie, die einen so niedrigen TCR hat, dass er im Wesentlichen über den gesamten militärischen Temperaturbereich linear ist.

Durch verschiedene Manipulationen der Temperatur während der Produktion oder der Materialdotierung während der Elemententwicklung kann diese charakteristische TCR-Kurve entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden (gedreht um den +25°C-Referenzpunkt). Was das Datenblatt nicht sagt, ist, dass die Drehung, die den niedrigeren TCR in einem Bereich bewirkt, auch den TCR in anderen Temperaturbereichen verschlechtert. Entwickler sollten also vermeiden, sich vom TCR im engen Bereich ablenken zu lassen, wenn dies dazu führt, dass sie die Verschlechterung des TCR in den anderen Bereichen übersehen. Solange das Datenblatt nicht die vollständige TCR-Kurve über den gesamten Temperaturbereich zeigt, können Sie nicht sagen, wie sie zwischen den Endtestpunkten und über andere Temperaturbereiche als den pfeilförmig fokussierten Teiltemperaturbereich ist.

Kurz gesagt sollte der TCR der geplanten Widerstände über alle Temperaturbereiche hin-



Drahtwiderstände im Einsatz

weg vollständig spezifiziert sein. Datenblätter, die ein wichtiges Detail in einem Merkmal nicht beschreiben, müssen in allen Details als verdächtig angesehen werden. Außerdem muss das Spannungs-Dehnungs-Gleichgewicht über den gesamten Temperatur- und Leistungsbereich von Präzisionswiderständen so definiert sein, dass es die Elastizitätsgrenze (hookesches Gesetz) für jedes verwendete Material überschreiten kann und daher Einfluss darauf hat, ob die Leistungskriterien wiederholbar und zuverlässig sind. Hersteller von Widerständen geben nie an, ob der Widerstand ein hookescher Körper ist oder nicht.

TCR-Tracking

Einige Schaltungen erfordern konstante Verhältnisse zwischen einer Reihe von Widerständen, aber nicht die absolute Stabilität jedes einzelnen Widerstands. Beispielsweise hängt die Genauigkeit eines Operationsverstärkers von der Genauigkeit und der Stabilität der Verhältnisse der Eingangs-, Rückkopplungs- und Vorspannungswiderstände ab; wenn sich alle Widerstände zusammen bewegen, um das konstante Verhältnis beizubehalten, bleibt die Genauigkeit des Operationsverstärkers konstant. Der Widerstandshersteller kann Widerstände testen und einen Satz mit einer guten TCR-Anpassung auswählen, um die erforderliche Verhältnisstabilität über einen bestimmten Temperaturbereich zu erreichen. Dabei wird jedoch die leistungsbedingte Divergenz der

Widerstandswerte über die Lebensdauer vernachlässigt.

Wie oben beschrieben, werden die TCR-Werte aller Widerstände gemessen, nachdem alle Widerstände bei jeder gewünschten Temperatur stabilisiert sind; dann werden Sätze nach ihrer unmittelbaren Ähnlichkeit der TCRs erstellt. In der tatsächlichen Anwendung weisen jedoch nicht alle Widerstände die gleiche Verlustleistung auf, befinden sich nicht alle in identischen lokalen Temperaturumgebungen und haben nicht alle die gleiche interne Betriebstemperatur. Daher hängen die Änderungen des Verhältnisses nicht nur von den angepassten TCRs, sondern auch von den absoluten TCRs der einzelnen Widerstände ab.

Stellen Sie sich beispielsweise ein Design vor, bei dem Widerstände mit einem absoluten (unabhängigen) TCR von $\pm 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ mit einer Genauigkeit von $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ aufeinander abgestimmt werden müssen. Wenn alle Widerstände einen Anstieg der Umgebungstemperatur um 90°C erfahren, würde man erwarten, dass sich ihr Verhältnis um $+90^\circ\text{C} \times 2 \text{ ppm}/^\circ\text{C} = 180 \text{ ppm}$ oder $0,018 \text{ Prozent}$ ändert. Wenn jedoch ein Widerstand bei $+100^\circ\text{C}$ läuft, ergibt sich ein zusätzlicher Fehler in Höhe des absoluten TCR von $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ mal der Temperaturdifferenz von $+10^\circ\text{C}$, also ein zusätzlicher Fehler von 100 ppm , was zu einem Gesamtfehler des Verhältnisses von 280 ppm oder $0,028 \text{ Prozent}$ führt – was wiederum für jede Präzisionsanwendung viel zu viel ist.

Durch die Verwendung eines Satzes von Z-1-Foil-Bulk-Metal-Foil-Widerständen mit $\pm 0,2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ TCR-Nachlauf in der gleichen Anwendung würde zu einer viel engeren Verhältnisanpassung bei diesen Temperaturen führen. Ein Widerstand mit einem TCR von $+0,2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ bei 90°C würde sich um 18 ppm ($+0,0018 \text{ Prozent}$) ändern, der andere mit $-0,2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ bei 100°C würde sich um -20 ppm ($-0,0020 \text{ Prozent}$) ändern, was einer Gesamtänderung des Verhältnisses von 38 ppm ($0,0038 \text{ Prozent}$) entspricht, verglichen mit $0,028 \text{ Prozent}$ für das Beispiel mit dem Dünnschichtwiderstand. Der Fehler des TCR-Satzes mit Dünnschichtwiderstand ist mehr als siebenmal größer als der Fehler des natürlichen, unangepassten Foliensatzes mit von Natur aus niedrigem TCR. Darüber hinaus bieten Widerstände mit inhärent niedrigem TCR eine hervorragende TCR-Nachführung, selbst wenn sich die Widerstände auf verschiedenen Platinen in verschiedenen Geräten an unterschiedlichen Orten befinden. Für alle wichtigen Präzisionsanwendungen, bei denen die Widerstände unterschiedlichen internen Betriebstemperaturen ausgesetzt sein können, ist es unerlässlich, dass die Widerstände sehr niedrige absolute TCRs haben, nicht nur eng angepasste (oder relative) TCRs. Auch hier sind neben den beworbenen Spezifikationen (absoluter TCR in diesem Fall sowie TCR-Match oder Track) alle detaillierten Spezifikationen erforderlich.

Last but not least gibt es in der Industrie eine Faustregel, die besagt, dass der absolute TCR

eines jeden Widerstandes nicht mehr als das Dreifache des TCR-Trackings zwischen den Widerständen der Gruppe sein sollte.

Feuchtigkeitsbeständigkeit

Sowohl die militärische Widerstandsspezifikation MIL-PRF-55182 als auch MIL-PRF-55342 beinhalten Beständigkeitstests. Bei MIL-PRF-55342 wird während des Feuchtigkeits-tests keine Leistung angelegt, während bei MIL-PRF-55182 100 Prozent der Nennleistung angelegt werden. Das sagt aber noch nicht alles aus. Jedes Epoxid und jedes Kunststoffmaterial absorbiert Feuchtigkeit. Widerstände sind Temperaturschwankungen, Feuchtigkeitschwankungen und Druckschwankungen ausgesetzt. Dadurch wird Feuchtigkeit in den Widerstand gezogen. Zwar reicht die Feuchtigkeit vielleicht nicht aus, um bei statischen Messungen eine signifikante Widerstandsänderung zu bewirken, aber die Anwendung kann unter verschiedenen Umweltbedingungen ernsthafte Folgen haben.

Wenn der Widerstand sehr heiß läuft, wird die Feuchtigkeit herausgetrieben; läuft der Widerstand jedoch bei niedriger Gleichstromleistung in Gegenwart von Feuchtigkeit, sind die Bedingungen reif für Ätzungen und katastrophale Ausfälle. Es ist nicht genug Strom vorhanden (der sich in Wärme umsetzt), um die Feuchtigkeit zu verdrängen, aber es wird immer noch ein elektrisches Feld über dem Widerstandselement aufgebaut. Es gibt auch Verunreinigungen, die von den Verkapselungsmaterialien in den Widerstand gezogen werden können, und möglicherweise einige Restverunreinigungen aus der Produktion. In Gegenwart von Feuchtigkeit können sich diese Verunreinigungen auf dem Widerstandselement ablagern und Teile davon anätzen. Dieses Phänomen kann dazu führen, dass Dünnschichtwiderstände bereits nach wenigen Betriebsstunden aufbrechen.

Die Gefahr des Ätzens ist nicht unerheblich, da die Entwickler stets versuchen, Präzisionswiderstände mit der geringstmöglichen Leistung zu betreiben, um die kleinstmögliche langfristige Widerstandsänderung zu erzielen. So sind die besten Leistungsbedingungen für die Lebensdauerstabilität gleichzeitig die schlechtesten Leistungsbedingungen für Gleichstromanwendungen in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit. Bulk-Metallfolienwiderstände unterliegen demselben Phänomen wie Dünnschichtwiderstände, aber ihre Widerstandselemente sind hunderte Male dicker als Dünnschichtwiderstände und erfordern daher hunderte Male mehr Chemie, um den gleichen

Schaden zu verursachen. In diesem Fall ist zu beachten, dass die in den Datenblättern angegebenen Feuchtigkeitsbeständigkeitstests möglicherweise nicht tatsächlichen Betriebsbedingungen entsprechen und möglicherweise keine ausreichende Warnung vor katastrophalem Versagen geben.

Verlässlichkeit und Stabilität

Jede Widerstandstechnologie hat einen Bereich, in dem sie ihre beste Leistung und Zuverlässigkeit bietet. Aufgrund des Wettbewerbsdrucks erweitern die Hersteller ihr Angebot jedoch auf den höchsten Wert, den sie produzieren und verkaufen können. Bei jeder Technologie weisen diese Produkte mit erweitertem Bereich nicht die gleiche Stabilität und Zuverlässigkeit auf wie ihre niedrigeren optimalen Widerstandsbereiche. Um eine optimale Zuverlässigkeit zu gewährleisten, ist es ratsam, nicht das oberste Drittel der Widerstandswerte zu verwenden, die von einem Hersteller für ein bestimmtes Modell und eine bestimmte Größe angeboten werden.

Ein Hersteller kann Angaben zur Lebensdauer oder andere Daten für sein Produkt machen und behaupten, dass diese repräsentativ für sein Produkt oder seine Technologie sind. Der Benutzer muss diese Daten jedoch sorgfältig auswerten, um sicher zu sein, dass sie die gesamte Bandbreite der vom Hersteller angegebenen Werte repräsentieren. Andernfalls könnte er feststellen, dass seine Schaltung nicht wie geplant funktioniert, weil die tatsächlich verwendeten Werte nicht annähernd so gut sind wie die Werte, die der Hersteller mit seinen sorgfältig ausgewählten Beispielen angegeben hat. Außerdem muss man sich vor den Daten hüten, die auf der Grundlage einiger weniger Stichproben von nur zehn oder zwanzig Einheiten vorgelegt werden. Solche »repräsentativen« Daten sind statistisch unbedeutend. Um wirklich aussagekräftig zu sein, müssen die Daten von vielen großen Losen mit fortlaufenden Tests über lange Zeiträume hinweg und von vielen Fertigungslosen stammen und die gesamte Bandbreite der angebotenen Werte umfassen.

Induktivität und Rauschen

Drahtgewickelte Präzisionswiderstände haben sowohl eine Induktivität als auch eine Kapazität. Der isolierte Draht ist mit vielen Windungen in Lagen um einen Kunststoff- oder Keramikspulenkörper gewickelt. Der Spulenkörper hat mehrere einzelne Abschnitte, die als »Pi«

Abschnitte bezeichnet werden. Normalerweise wird der Draht im ersten Pi-Abschnitt in eine Richtung gewickelt, dann über eine Kerbe in den nächsten Abschnitt geführt und in die entgegengesetzte Richtung gewickelt. Diese »Reverse Pi«-Wicklung soll die Induktivität verringern.

In einigen Fällen wird der Draht in der Mitte des ersten Pi-Abschnitts mit Klebeband abgeklebt, umgekehrt gewickelt und dann im nächsten Pi-Abschnitt verdoppelt, um die Induktivität weiter zu verringern. Der Hersteller bezeichnet diese Widerstände dann als »niederinduktiv«, macht aber keine Angaben zu einem bestimmten Induktivitätswert, da für verschiedene Widerstandskonfigurationen, Größen und Widerstandswerte unterschiedliche Drahtdurchmesser mit unterschiedlichem Widerstand und unterschiedlicher Länge verwendet werden. Diese ungenaue Klassifizierung der Induktivität ist kaum eine angemessene Grundlage, auf die man sich bei Hochfrequenzanwendungen verlassen kann. Außerdem sind drahtgewickelte Widerstände nur bei sehr niedrigen Werten, etwa 100 Ω und darunter, in erster Linie induktiv. Darüber hinaus sind drahtgewickelte Widerstände in erster Linie kapazitiv. Indem sie sich auf ihre »nicht-induktiven« Wickeltechniken konzentrieren, lenken die Hersteller die Entwickler von der Tatsache ab, dass der Blindwiderstand in Widerständen mit höheren Werten in erster Linie kapazitiv ist. Hersteller, die den genauen Kapazitätswert oder auch nur einen ungefähren Wert angeben, sind extrem selten, ja fast nicht vorhanden. Metallfolienwiderstände mit gleicher oder besserer Präzision haben eine maximale Induktivität von 0,1 μH und eine maximale Kapazität von 0,5 pF wie in ihren Datenblättern eindeutig angegeben.

ESD

Jedes Datenblatt für Präzisionswiderstände sollte eine ESD-Warnung (elektrostatische Entladung) enthalten. Ignorieren Sie diese Warnung niemals, denn ESD ist immer vorhanden und, wie Murphys Gesetz besagt, wartet sie nur darauf, im unpassendsten Moment zuzuschlagen. Einige Benutzer sagen, dass sie sich keine Sorgen über ESD machen, weil sie bipolare Halbleiter oder andere Schutzschaltungen verwenden. Das ist leichtsinnig, denn 1500 V ESD können die Dünnschichtwiderstandsschicht beschädigen, aber statische Ladungen können sogar noch viel höher sein als dieser Wert. Es kann nur dazu geraten werden, stets die ESD-geprüften Handhabungs- und Installationsverfahren zu befolgen. (eg) ■