

# Verwendung isolierter Komparatoren zur Fehlererkennung in Elektromotorantrieben

**Krunal Maniar**

Product marketing engineer  
Texas Instruments

## Einführung

Ein **Elektromotorantrieb** ist ein elektrisches System, das einen Frequenz Ausgang an einen Elektromotor zur Ansteuerung industrieller Lasten wie Heizung und Klimatisierung, Lüftung, Pumpen, Kompressoren und Aufzüge sowie Lasten im Bereich der Fertigungsautomatisierung wie Förderbänder, Bergbau und Papierfabrikaurüstung bereitstellt.

Elektromotorantriebe in industriellen Umgebungen sind Bedingungen ausgesetzt, wie hohe Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit, Schwankungen der AC-Stromleitung und mechanische Überlastungen. Die Anwender verlangen nach mehr Effizienz und Zuverlässigkeit. Die Schaltgeschwindigkeiten von Leistungshalbleiterbausteinen wie Bipolartransistoren mit isoliertem Gate (IGBTs) nehmen ständig zu. Technologien mit breitem Bandabstand wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN), die schnellere Schaltgeschwindigkeiten ermöglichen, werden zunehmend eingesetzt. Angesichts des steigenden Bedarfs an höheren Schaltgeschwindigkeiten und mehr Systemzuverlässigkeit müssen moderne Motorantriebssysteme mehrere Fehlerereignisse erkennen und vor ihnen schützen, um Ausfallzeiten von Industrieanlagen zu minimieren.

In diesem Artikel werde ich über die Prioritätsstufe und Auswirkungen verschiedener Fehlerereignisse, die Möglichkeiten ihrer Erkennung, um Schäden an Motorantriebsschaltkreisen zu vermeiden, sprechen.

## Einführung in Elektromotorantriebe

Ein elektrisches Motorantriebssystem, wie gezeigt in **Abbildung 1**, bezieht Strom aus dem Wechselstromnetz, richtet diesen in Gleichspannung um und invertiert den Gleichstrom mit variabler Größe und Frequenz, basierend auf dem Lastbedarf durch komplexe Regelalgorithmen für Rückkopplungsregelung, zurück in Wechselstrom.

Ein Motorantriebssystem besitzt typischerweise zwei Spannungsbereiche: Den Hochspannungsbereich und den Niederspannungsbereich. Der Mikrocontroller oder digitale Signalprozessor, der sich typischerweise im Niederspannungsbereich befindet, empfängt Rückkopplungssignale (Spannung, Strom, Temperatur usw.) von der dreiphasigen IGBT-Leistungsstufe und erzeugt pulswidenmodulierte Signale zur Steuerung der Leistungsschalttransistoren und anderer Highside-Leistungsschaltungen. Solche Systeme erfordern eine robuste und zuverlässige galvanische Trennung, um Hochspannungsschaltungen von Niederspannungsschaltungen zu isolieren. Eine Isolierungsarchitektur ermöglicht den zuverlässigen Betrieb von Motorantriebssystemen. Sie verhindert Schäden an teuren Schaltkreisen, indem sie die Masseschleifen zwischen den hoch- und Niederspannungsschaltkreisen unterbricht und zum Schutz des Bedienpersonals vor hohen Spannungen beiträgt.

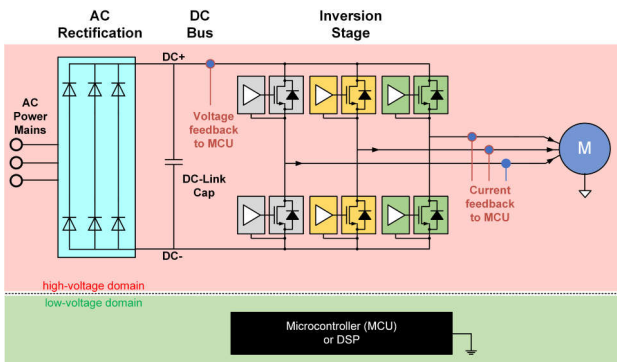


Abbildung 1. Blockschaltbild für Elektromotorantrieb mit AC-Eingang

### Verständnis von Fehlerereignissen in Elektromotorantrieben

Elektromotorantriebe sind anfällig für verschiedene elektrische Fehlerereignisse. Wie gezeigt in **Abbildung 2**, tritt ein Shoot-Through-Fehler auf, wenn die benachbarten Leistungsschalttransistoren 1 und 2 versehentlich gleichzeitig eingeschaltet werden. Dieser Fehler kann aus mehreren Gründen auftreten: elektromagnetische Störung, Fehlfunktion des Mikrocontrollers zur Steuerung der Schalttransistoren oder einfach abgenutzte Schalttransistoren. Dieser Fehler führt zu einem Kurzschluss des DC-Link-Kondensators und kann zu einem katastrophalen Ausfall mit übermäßiger Erwärmung, einem Brand oder sogar einer Explosion führen. Daher ist es unerlässlich, Shoot-Through-Fehler zu erkennen und Korrekturmaßnahmen zu ergreifen, wie zum Beispiel das sehr schnelle Ausschalten des Leistungsschalttransistors.

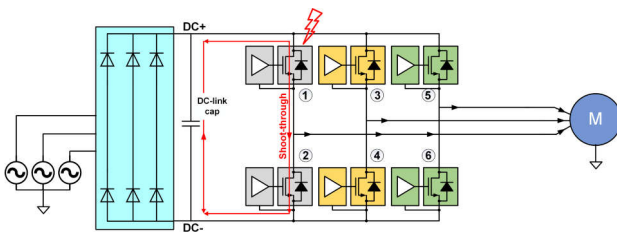


Abbildung 2. Ein Shoot-Through-Fehler in Elektromotorantrieben.

Wie dargestellt in **Abbildung 3**, tritt ein Erdschluss auf, wenn die Motorkabel, das Motorgehäuse oder die Motorwicklungen gegen Masse kurzgeschlossen werden. Solche Kurzschlüsse gegen Masse können

aufgrund einer Verschlechterung der dielektrischen Festigkeit in der Isolierung durch Überlastung bei Temperatur oder Spannung über einen längeren Zeitraum auftreten. Alte Motoren und Kabel sind anfälliger für Erdschlussereignisse, die menschliche Bediener einem Stromschlagrisiko aussetzen können. Daher erfordert ein Erdschluss die Erkennung und Korrekturmaßnahmen, wie zum Beispiel das Neuwickeln oder Austauschen des Motors.

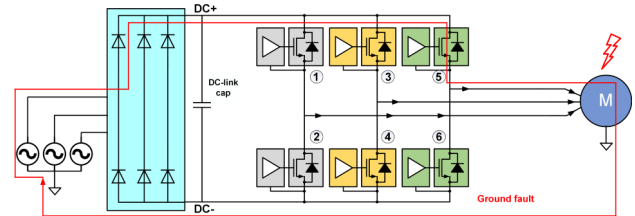


Abbildung 3. Erdschluss in Elektromotorantrieben.

Wie dargestellt in **Abbildung 4**, tritt ein Phase-Phase-Kurzschlussfehler auf, wenn zwischen zwei Wicklungen der beiden Phasen am Stator ein Isolationsbruch auftritt. Diese Phase-zu-Phase-Kurzschlüsse können aufgrund einer Verschlechterung der dielektrischen Stärke in der Isolierung durch Überlastungsbedingungen bei Temperatur oder Spannung über einen längeren Zeitraum auftreten. Dieser kurze Vorgang führt zu einem enormen Anstieg des Statorstroms, was zu potenziellen Schäden an den IGBTs in der Leistungsstufe führen kann. Alte Motoren und Kabel sind anfälliger für Phase-Phase-Kurzschlüsse. Wie Erdschluss-Fehler müssen auch Phase-zu-Phase-Fehler erkannt und korrigiert werden, z. B. durch Neuwickeln oder Austauschen des Motors.

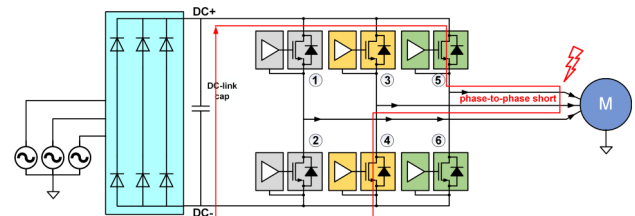


Abbildung 4. Ein Phase-zu-Phase-Kurzschluss in Elektromotorantrieben.

Überspannung tritt aus mehreren Gründen auf – Rückeinspeisung vom Motor zur DC-Link-Schiene

beim Bremsen, schlechte Regelung von anormalen Schaltungslasten der Wechselstromversorgung, Verdrahtungsfehler und Isolationsfehler. Überspannung kann zu Spannungsüberlastungen und Überstrom führen, die die DC-Link-Kondensatoren und IGBTs beschädigen, die elektrische Isolierung verschlechtern und ein Motorantriebssystem beschädigen oder dessen Lebensdauer verkürzen können. Es ist äußerst wichtig, die thermische Energie durch den IGBT zu begrenzen, indem der Shoot-through, Erdschluss und Phase-zu-Phase-Kurzschlüsse unterbrochen oder reduziert werden, sowie transiente Überspannungsbedingungen zu vermeiden.

## Zuverlässige Erkennung und Schutz in Elektromotorantrieben

Entwickler müssen mehrere Ebenen zuverlässiger Erkennung und Schutz integrieren, um Schäden an Motorantriebsschaltkreisen zu vermeiden.

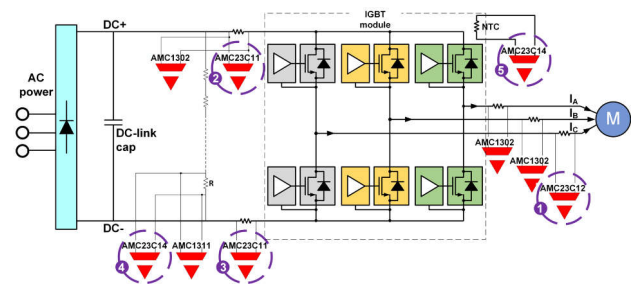
Leistungsschaltransistoren wie IGBTs haben relativ kurze Widerstandszeiten (weniger als 10  $\mu\text{s}$ ) und können schnell überhitzen und durch übermäßige Ströme beschädigt werden.

Strombegrenzungssicherungen und Leistungsschalter bieten einen hervorragenden Überstromschutz, sind jedoch mit langsamen Reaktionszeiten ausgestattet und erfordern ein Eingreifen des Benutzers. Sie sind oft die letzte Möglichkeit zum Schutz bei einem Ausfall.

Um den Motorantrieb schnell gegen diese Fehlerzustände zu erkennen und zu schützen, erfasst eine Lösung Strom und Spannung an kritischen elektrischen Pfaden innerhalb des Motorantriebs. Der gemessene Strom und die gemessene Spannung werden von einem Host-Mikrocontroller empfangen, der High-Side-Stromversorgungsschaltungen wie Leistungsschaltransistoren und Leistungsschalter steuert. Um Überstrom- oder Überspannungsfehler zu unterdrücken, schaltet sich der Host-Mikrocontroller entweder ab, modifiziert die Schalteigenschaften der

Leistungstransistoren oder schaltet die Leistungsschalter aus.

**Abbildung 5** zeigt die **AMC23C14**-Familie von verstärkten isolierten Komparatoren mit kurzer Latenzzeit von Texas Instruments (TI) in Fehlererkennungsszenarien für Kurzschluss, Überstrom, Unterstrom, Überspannung, Unterspannung und Übertemperatur. Diese Bausteine integrieren einstellbare Komparatorschwellenfunktionen, enthalten einen High-Side-Low-Dropout-Regler für die Stromversorgung und haben eine Reaktionszeit von unter 0,5  $\mu\text{s}$  in einem 8-poligen kleinen integrierten Schaltungsgehäuse.

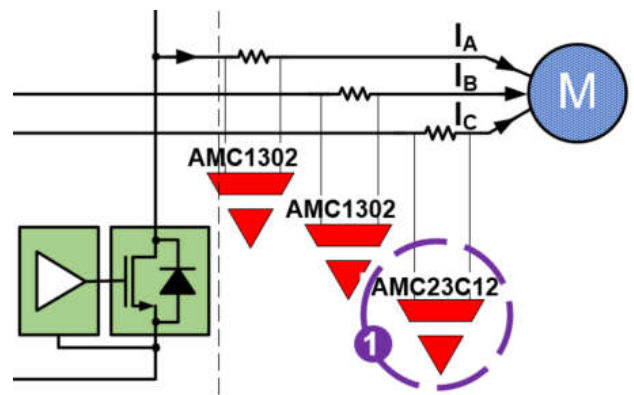


**Abbildung 5.** Ultraschnelle Fehlererkennung in Elektromotorantrieben.

Sehen Sie sich als Nächstes die verschiedenen Anwendungsfälle für die **AMC23C14**-Familie von isolierten Komparatoren in Elektromotorantrieben an.

## Anwendungsfall Nr. 1: Bidirektionale Phasenüberstromerkennung

**Abbildung 6** zeigt, wie der **AMC23C12** zur bidirektionalen in-Phasenüberstromerkennung verwendet werden kann.



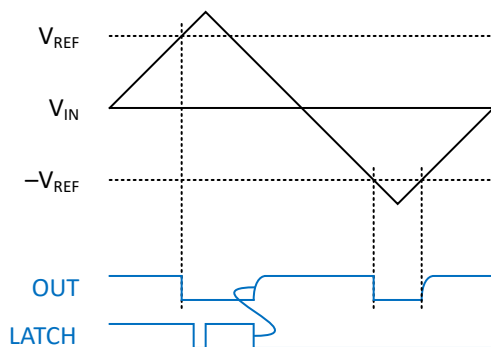
**Abbildung 6.** Bidirektionale Phasenüberstromerkennung.

In einem voll funktionsfähigen Dreiphasen-Wechselstrommotorantriebssystem sollte die Summe des Dreiphasenstroms zum Wechselstrommotor unabhängig von Brems- oder Betriebsbedingungen null sein (d.h.  $I_A + I_B + I_C = 0$ ).

Die Berechnung des dritten Phasenstroms in Low- bis Mid-End-Motorantrieben anhand des gemessenen Stroms auf zwei Phasen kann zur Kostensenkung beitragen. Ich empfehle, den Strom in der dritten Phase zu überwachen, um elektrische Fehlerereignisse zu erkennen. Sie könnten zwar einen Stromsensor mit einem isolierten Verstärker oder Modulator an der dritten Phase platzieren, aber Sie könnten auch einen verstärkten isolierten Fensterkomparator **AMC23C12** für die Einfachheit, Kosteneffizienz und Lösungsgröße verwenden. Der AMC23C12 bietet bidirektionale Überstromerkennung mit einem integrierten Fensterkomparator.

Wie in Position 1 von **Abbildung 6** gezeigt, erzeugt ein Shunt-Widerstand einen Spannungsabfall, den der AMC23C12 verstärkte Fensterkomparator wahrnimmt. Der AMC23C12 verfügt über einen Open-Drain-Ausgang, OUT, der aktiv nach unten zieht, wenn die Eingangsspannung die vordefinierten Schwellenwerte der Spannung am Referenzpin zum Zwecke der Überstromerkennung überschreitet. **Abbildung 7** zeigt eine Ausgangswellenform für ein Überstromereignis.

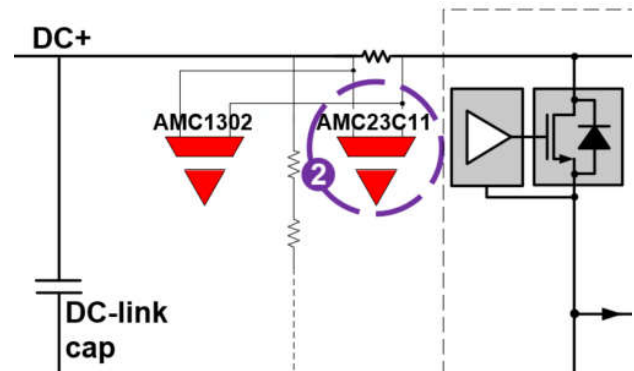
Zur Überstrom- und Kurzschlusserkennung kann der Dual-Fensterkomparator AMC23C14 verwendet werden.



**Abbildung 7.** AMC23C12-Ausgangswellenform.

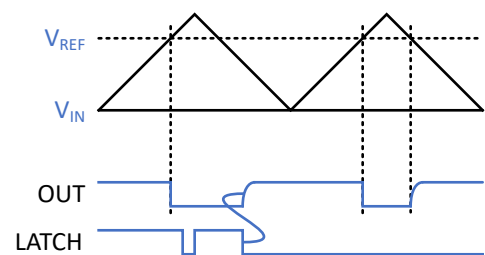
## Anwendungsfall Nr. 2: DC+-Überstromerkennung

Wie in Position 2 von **Abbildung 8** gezeigt, kann der **AMC23C11** eine gute Wahl für die DC+-Überstromerkennung sein.



**Abbildung 8.** DC+-Überstromerkennung.

**Abbildung 9** zeigt eine Ausgangswellenform für ein Überstromereignis. Wie der AMC23C12 verfügt der AMC23C11 über einen Open-Drain-Ausgang, AUS, der aktiv nach unten zieht, wenn die Eingangsspannung den vordefinierten Spannungsschwellenwert am Referenzpin überschreitet. Der AMC23C11 unterstützt auch den verriegelten Modus mit einem LATCH-Eingangspin, der den Ausgang erst löscht, nachdem der Latch gelöscht wurde. Wenn Sie sowohl Überstrom- als auch Kurzschlusserkennung benötigen, können Sie mit dem AMC23C14 die beiden Schwellenwerte für die Überstrom- bzw. Kurzschlusserkennung festlegen.



**Abbildung 9.** AMC23C11-Ausgangswellenform.

## Anwendungsfall Nr. 3: DC-Überstrom- oder Kurzschlusserkennung

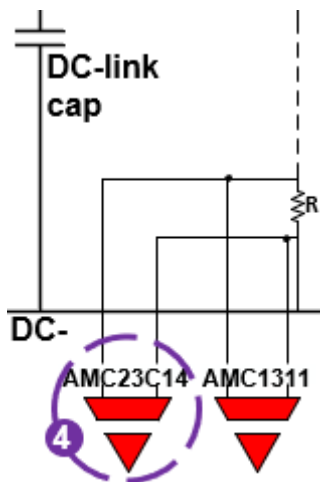
Ähnlich wie in Anwendungsfall Nr. 2 erläutert, kann auch der AMC23C11 zur Erkennung von Überstrom

in der Gleichstromleitung verwendet werden. Wenn Sie sowohl Überstrom- als auch Kurzschlusserkennung benötigen, können Sie mit dem AMC23C14 die beiden Schwellenwerte für die Überstrom- bzw. Kurzschlusserkennung festlegen.

#### Anwendungsfall Nr. 4: DC-Link (DC+ zu DC-) Überspannungs- und Unterspannungserkennung

Die DC-Link-Spannung muss für den ordnungsgemäßen Betrieb des Motorantriebs im angegebenen Bereich liegen. Der AMC23C14 kann eine gute Wahl zur Erkennung von über- und Unterspannungsbedingungen sein.

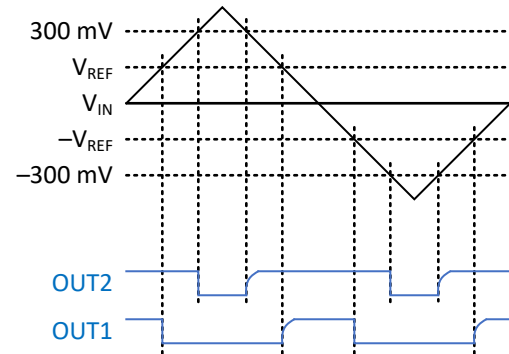
Wie in Position 4 von **Abbildung 10** zeigt, erzeugt der untere Widerstand eines Widerstandsteiler-Netzwerks einen Spannungsabfall, der vom zweifachen verstärkten Fensterkomparator AMC23C14 gemessen wird.



**Abbildung 10.** Erkennung von über- und Unterspannung bei DC-Links.

Der AMC23C14 verfügt über zwei Open-Drain-Ausgänge, OUT1 und OUT2, einen für jeden Fensterkomparator. OUT1 zieht aktiv nach unten, wenn die Eingangsspannung zum Zwecke der Unterspannungserkennung die vordefinierten Schwellenwerte der Spannung am Referenzpin überschreitet. OUT2 zieht aktiv nach unten, wenn die Eingangsspannung die von der internen 300 mV-

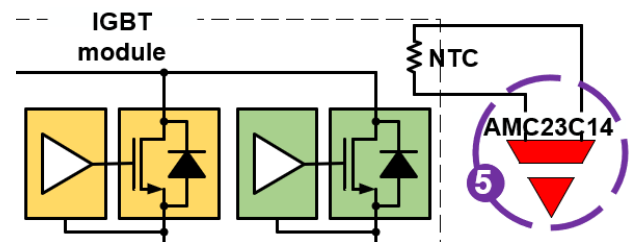
Referenz zur Überspannungserkennung definierten Schwellenwerte überschreitet. **Abbildung 11** zeigt die OUT1 und OUT2 Ausgänge für über- und Unterspannungsereignisse. Wenn Sie nur eine Überspannungserkennung benötigen, können Sie den AMC23C11 verwenden.



**Abbildung 11.** AMC23C14 Ausgangswellenform.

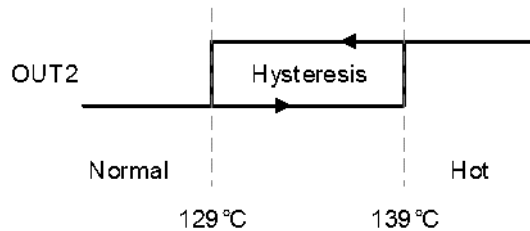
#### Anwendungsfall Nr. 5: Übertemperaturerkennung des IGBT-Moduls

Wie gezeigt in **Abbildung 12**, befindet sich typischerweise ein Thermistor mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC) im IGBT-Modul zur Erkennung von langfristigen Überlastbedingungen. Diese NTC-Klemmen werden zur Hauptstromplatte geführt, wo der AMC23C14 zur Übertemperaturerkennung verwendet werden kann.



**Abbildung 12.** Übertemperaturerkennung des IGBT-Moduls.

**Abbildung 13** zeigt die Ausgangswellenform bei einem Übertemperaturereignis, bei dem OUT2 nach oben zieht, wenn die Eingangsspannung die in der internen 300-mV-Referenz festgelegten Schwellenwerte überschreitet. Der Referenzpin des AMC23C14 wird mit einer 100  $\mu$ A-Stromquelle verbunden, welche den NTC vorspannen kann.



**Abbildung 13.** AMC23C14 Ausgangswellenform.

Die Nachfrage nach verbesserter Systemzuverlässigkeit und der Einsatz von Bausteinen mit schnellerer Schaltung nimmt rasant zu. Daher löst die **AMC23C14**-Familie von verstärkten isolierten Komparatoren mit kurzer Latenzzeit den kritischen Bedarf nach genauer und schneller Erkennung in Elektromotorantrieben

**Wichtiger Hinweis:** Die hier beschriebenen Produkte und Dienstleistungen von Texas Instruments Incorporated und seinen Tochterunternehmen werden unter den Standard-Verkaufsbedingungen von TI verkauft. Den Kunden wird empfohlen, aktuelle und vollständige Informationen zu TI-Produkten und Dienstleistungen einzuholen, bevor sie Bestellungen platzieren. TI übernimmt keine Haftung für Anwendungsunterstützung, Kundenanwendungen oder Produktdesigns, Softwareleistung oder Verletzung von Patenten. Die Veröffentlichung von Informationen über Produkte oder Dienstleistungen anderer Unternehmen bedeutet keine Genehmigung, Garantie oder Empfehlung seitens TI.

All trademarks are the property of their respective owners.

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated