

Analog Engineer's Circuit

Isolierte Strommessschaltung mit Frontend-Verstärkungsstufe



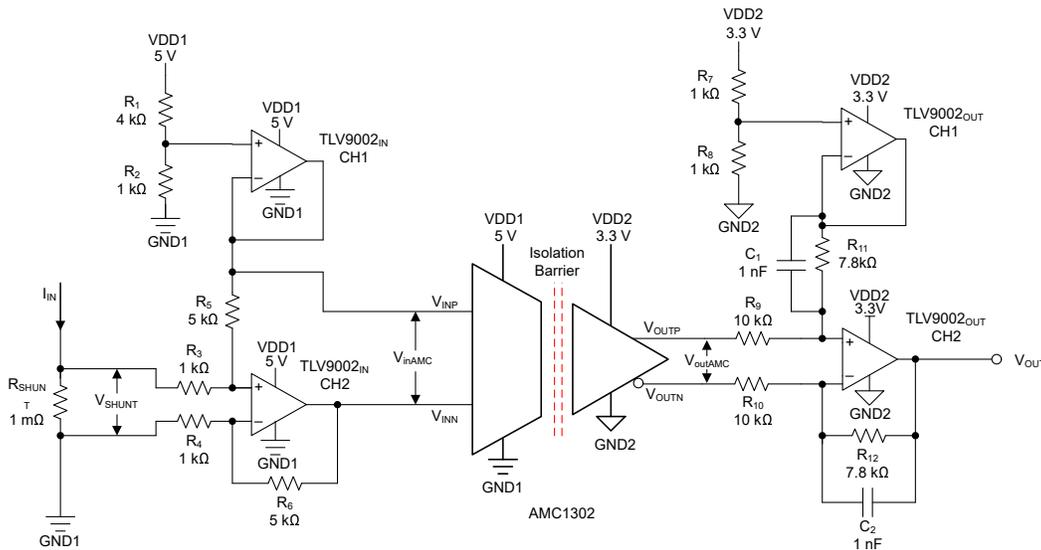
Data Converters

Designziele

Stromquelle (Nominal)		Stromquelle (Kurz)	Eingangsspannung		Ausgangsspannung	Stromversorgung	
$I_{IN\ MIN}$	$I_{IN\ MAX}$	$I_{CH\ KURZ}$	$V_{SHUNT, MIN}$	$V_{SHUNT, MAX}$	V_{OUT}	V_{DD1}	V_{DD2}
$\pm 10\ mA$	$\pm 10\ A$	$\pm 200\ A$	$\pm 10\ \mu V$	$\pm 10\ mV$	55 mV–3,245 V	5 V	3,3 V

Designbeschreibung

Einige Anwendungen benötigen eine Schaltung zur Messung kleiner Nennströme bei gleichzeitig hohem Kurzschlussstrom, wie zum Beispiel Leistungsschalter. Dieses Schaltungsdesigndokument beschreibt eine isolierte Strommessschaltung, welche Nennlastströme von $\pm 10\ mA$ bis $\pm 10\ A$ genau messen kann, und dabei einem Kurzschlussstrom von bis zu $\pm 200\ A$ standhält. Für die Zwecke dieser Schaltung nehmen Sie an, dass der Ausgang mit einem unsymmetrischen 3,3 V-ADC verwendet wird. z. B. eine, die in einem MSP430 integriert ist. Die Isolierung zwischen dem gemessenen Eingangsstrom und dem ADC wird mit einem isolierten Verstärker (AMC1302) erreicht. Bei einem $1\ m\Omega$ -Shunt-Widerstand erzeugt der erwartete minimale Nennstrom ein $\pm 10\ \mu V$ -Signal, ein Signal, das aufgrund der Totzone des Delta-Sigma-Modulators zu klein ist, um eine genaue Auflösung nahe einem Spannungseingang nahe Null zu erreichen. Um dies zu beheben, verwendet der Schaltkreis einen 2-Kanal-Operationsverstärker (TLV9002), der das Signal um eine Verstärkung von 5 V/V verstärkt und die Gleichtaktspannung auf 1 V stellt. Dadurch wird nicht nur der minimale Nennstrom aus der Totzone entfernt, sondern auch der maximale Nennstrom erhöht, um dem linearen Vollausschlag-Eingangsbereich des isolierten Verstärkers zu entsprechen. Der lineare Vollausschlag-Eingangsbereich des isolierten Verstärkers beträgt $\pm 50\ mV$ bei einem differentiellen Ausgangsspannungshub von $\pm 2,05\ V$ bei einer Gleichtaktspannung von 1,44 V und einer festen internen Verstärkung von 41 V/V. Auf der Ausgangsseite des isolierten Verstärkers wird ein zweiter 2-Kanal-Operationsverstärker (TLV9002) verwendet, bei dem: der erste Kanal wird verwendet, um die unsymmetrische Gleichtaktspannung auf 1,65 V einzustellen, und der zweite Kanal wandelt das differentielle Ausgangssignal vom isolierten Verstärker in ein unsymmetrisches Signal um, das mit einem unsymmetrischen 3,3 V-ADC verwendet werden kann.



Designhinweise

- Der AMC1302 wurde aufgrund des geringen Stromverbrauchs und der Auflösung sowie des vollen Eingangsspannungsbereichs von ± 50 mV des Verstärkers als isolierter Verstärker ausgewählt.
- Der TLV9002 wurde als Operationsverstärker für das kostengünstige, kompakte Zweikanalgehäuse mit geringem Offset ausgewählt.
- Wählen Sie eine rauscharme Quelle mit niedriger Impedanz sowohl für VDD1 als auch für VDD2, die die TLV9002_{IN}, TLV9002_{OUT}, und AMC1302 mit Strom versorgen und gleichzeitig die Gleichtaktspannung für den unsymmetrischen Ausgang einstellen.
 - VDD1 verweist auf GND1 und VDD2 auf GND2.
- Für höchste Genauigkeit verwenden Sie einen Präzisions-Shunt-Widerstand mit einem niedrigen Temperaturkoeffizienten.
- Wählen Sie den Shunt-Widerstand für den erwarteten Nennstrom und den Kurzschluss am Eingang.
 - Für einen kontinuierlichen Betrieb sollten die Shunt-Widerstände unter normalen Bedingungen gemäß IEEE-Standards nicht mit mehr als zwei Dritteln des Nennstroms betrieben werden. Eine weitere Reduzierung des Shunt-Widerstands oder eine Erhöhung der Nennleistung kann für Anwendungen mit strengen Verlustleistungsanforderungen erforderlich sein.
 - Auf Kurzschlussstrom prüfen Sie die Kurzzeit-Überlastspezifikation im Datenblatt des Shunt-Widerstands. Der Strom beträgt oft $5 \times$ der Nennverlustleistung.
 - Unterstützung bei der Berechnung der Verlustleistung finden Sie im [Excel Calculator zur Strommessung für isolierte Verstärker](#).
- Verwenden Sie die richtigen Widerstandsteilerwerte, um die Gleichtaktspannung auf Kanal 1 des TLV9002_{IN} und TLV9002_{OUT} einzustellen. Stellen Sie sicher, dass die Eingangsgleichtaktspezifikation des isolierten Verstärkers nicht verletzt wird.
- Wählen Sie die richtigen Werte für die Verstärkungseinstellwiderstände auf Kanal 2 von TLV9002_{OUT}, damit der unsymmetrische Ausgang über einen geeigneten Ausgangsspannungshub verfügt.

Designschritte

- Bestimmen Sie den geeigneten Shunt-Widerstandswert anhand des maximalen Nennstroms.

$$R_{SHUNT} = \frac{V_{inMax}}{I_{inMax}} = \frac{50 \text{ mV}}{10 \text{ A}} = 5 \text{ m}\Omega$$

- Da dieser Shunt-Widerstand in der Lage sein muss, einem 200 A-Kurzschlussstrom standzuhalten, reduzieren Sie den Shunt-Widerstand um einen Faktor von 5, der in [Schritt 6](#) kompensiert wird. Bestimmen Sie die Verlustleistung des Shunt-Widerstands während des Betriebs mit maximalem Nennstrom.

$$Power_{RSHUNT} = I_{inMax}^2 \times R_{SHUNT} = 100 \text{ A}^2 \times 1 \text{ m}\Omega = 0.1 \text{ W}$$

Bestimmen Sie die Verlustleistung des Shunt-Widerstands während des Betriebs mit minimalem Nennstrom.

$$Power_{RSHUNT} = I_{inMin}^2 \times R_{SHUNT} = 0.1 \text{ mA}^2 \times 1 \text{ m}\Omega = 0.1 \mu\text{W}$$

- Bestimmen Sie die Verlustleistung des Shunt-Widerstands während eines Kurzschlusses. Vergewissern Sie sich, dass die ausgewählte kurzzeitige Überlastspezifikation (normalerweise $5 \times$ nominal) der durch den Kurzschluss abgegebenen Leistung standhalten kann.

$$Power_{RSHUNT} = I_{inShort}^2 \times R_{SHUNT} = 40,000 \text{ A}^2 \times 1 \text{ m}\Omega = 40 \text{ W}$$

Wählen Sie einen Shunt-Widerstand mit einer um den Faktor 5 reduzierten Verlustleistung. Wenn also die kurzfristige Überlastanforderung 40 W beträgt, dann ist die Shunt-P-Verlustleistung = 8 W im analogen Designjournal [Design considerations for isolated current sensing](#) zu finden.

- Kanal 1 der TLV9002_{IN} wird verwendet, um die 1 V-Gleichtaktspannung des unsymmetrischen Ausgangs von Kanal 2 der TLV9002_{IN} einzustellen. Die 1 V-Ausgangsspannung von Kanal 1 wird ebenfalls an den PLUS-Eingang des AMC1302 gesendet. Mit einer 5 V-Versorgung kann ein einfacher Widerstandsteiler verwendet werden, um 5 V auf 1 V zu teilen. Unter Verwendung von 4 k Ω für R₁ kann R₂ mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$R_2 = \frac{V_{CM} \times R_1}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.00 \text{ V} \times 4000 \Omega}{5.00 \text{ V} - 1.00 \text{ V}} = 1000 \Omega$$

- Kanal 2 von TLV9002_{IN} wird verwendet, um die Spannung vom Shunt-Widerstand zu verstärken, sodass der gesamte Eingangsspannungsbereich des AMC1302 zum Messen des maximalen Nennstrombereichs genutzt wird. Bei einem Shunt-Widerstand von 1 m Ω und einem maximalen Nennstrom von ± 10 A beträgt die Ausgangsspannung des Shunt-Widerstands ± 10 mV. Da die maximale Eingangsspannung des AMC1302 ± 50 mV beträgt, muss der Ausgang des Shunt-Widerstands um 5 V/V verstärkt werden. Während R₃|R₄ bei 1 k Ω gehalten wird, kann der Widerstandswert von R₅|R₆ mit der folgenden Gleichung ermittelt werden.

$$Gain \left(\frac{V}{V} \right) = \frac{R_{5,6}}{R_{3,4}}; R_{5,6} = Gain \left(\frac{V}{V} \right) \times R_{3,4} = 5 \text{ V/V} \times 1 \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

- Vergewissern Sie sich, dass die absoluten maximalen Spannungsgrenzwerte am Eingang von AMC1302 bei einem Kurzschluss mit dem ausgewählten Shunt-Widerstand nicht verletzt werden. Ein Kurzschlussstrom von 200 A führt dazu, dass eine Differenzspannung von 1 V an den AMC1302 angelegt wird. Da der Eingangsgleichtakt auf 1 V eingestellt ist, werden am negativen Eingang des AMC1302 maximal 2 V bezüglich GND1 angelegt.

$$V_{inAMC} = 200 \text{ A} \times 0.001 \Omega \times 5 \text{ V/V} = 1 \text{ V}$$

Die absolute maximale Eingangsspannung des AMC1302 ist 500 mV höher als die High-Side-Versorgungsspannung (wie im Datenblatt [Verstärker mit verstärkter Isolierung für den Präzisionseingang AMC1302 mit \$\pm 50\$ mV](#) angegeben). Bei einer High-Side-Versorgungsspannung von 5 V wird die absolute maximale Eingangsspannung nicht verletzt.

- Kanal 1 der TLV9002_{OUT} wird verwendet, um die 1,65 V-Gleichtaktspannung des unsymmetrischen Ausgangs von Kanal 2 der TLV9002_{OUT} einzustellen. Mit einer 3,3 V-Versorgung kann ein einfacher

Widerstandsteiler verwendet werden, um 3,3 V auf 1,65 V zu teilen. Unter Verwendung von 1 kΩ für R₇ kann R₈ mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$R_8 = \frac{V_{CM} \times R_7}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1,65 \text{ V} \times 1000 \Omega}{3,3 \text{ V} - 1,65 \text{ V}} = 1000 \Omega$$

8. Während der TLV9002 ein Rail-to-Rail-Operationsverstärker ist, kann der Ausgang eines TLV9002 nur maximal 55 mV von den Versorgungsschienen schwingen. Aus diesem Grund kann der unsymmetrische Ausgang von TLV9002_{OUT} von 55 mV auf 3,245 V (3,19 V_{pk-pk}) schwingen.
9. Die Ausgänge V_{OUTP} und V_{OUTN} des AMC1302 sind 2,05 V_{pk-pk}, 180 Grad phasenverschoben und haben eine Gleichtaktspannung von 1,44 V. Daher beträgt der Differenzausgang ±2,05 V oder 4,1 V_{pk-pk}.

Um innerhalb der Ausgangsbeschränkungen von TLV9002_{OUT} zu bleiben, muss der Ausgang des AMC1302 um den Faktor 3,2 / 4,1 gedämpft werden. Bei R₉ = R₁₀ und R₁₁ = R₁₂ kann für die Berechnung von R₁₁ und R₁₂ die folgende Übertragungsfunktion für die Differenzstufe zur unsymmetrischen Stufe verwendet werden.

$$V_{OUT} = (V_{OUTP} - V_{OUTN}) \times \left(\frac{R_{11,12}}{R_{9,10}} \right) + V_{CM}$$

10. Unter Verwendung des zuvor berechneten Ausgangsspannungshubs von TLV9002_{OUT} und der Einstellung R₉ und R₁₀ auf 10 kΩ können R₁₁ und R₁₂ mit der folgenden Gleichung auf 7,8 kΩ berechnet werden.

$$3,2 = (2,465 \text{ V} - 415 \text{ mV}) \times \left(\frac{R_{11,12}}{10 \text{ k}\Omega} \right) + 1,65$$

Mit standardmäßigen Widerstandswerten von 0,1 % kann ein Widerstand von 7,8 kΩ verwendet werden. Dies ermöglicht den maximalen Ausgangsspannungshub innerhalb der Grenzen des TLV9002.

11. Die Kondensatoren C₁ und C₂ sind parallel zu den Widerständen R₁₁ und R₁₂ angeordnet, um Hochfrequenzsignale zu begrenzen. Bei R₁₁ = R₁₂ und C₁ = C₂ kann die Grenzfrequenz mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R_{11,12} \times C_{1,2}}$$

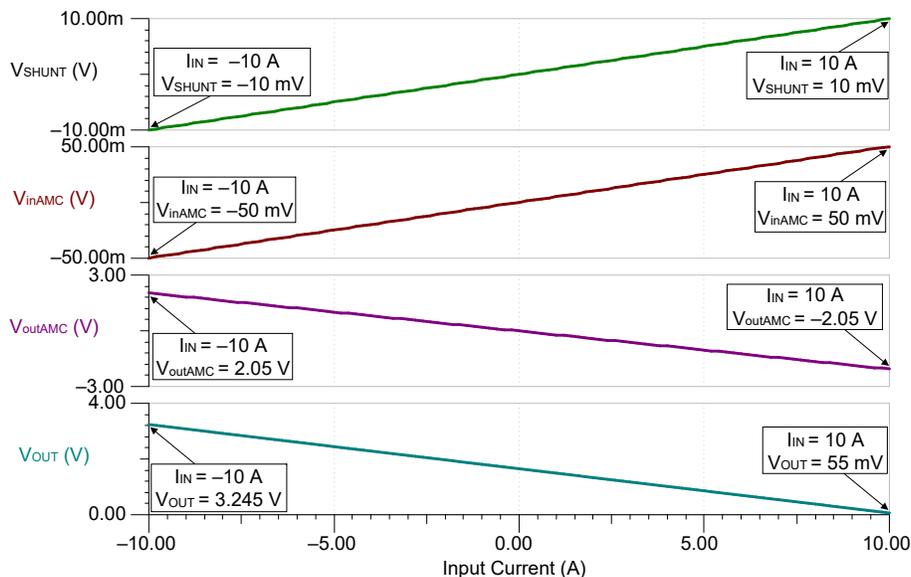
Wenn C₁ = C₂ = 1 nF und R₁₁ = R₁₂ = 7800 Ω ist, kann die Grenzfrequenz auf 20,414 kHz berechnet werden.

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 7800 \Omega \times 1 \text{ nF}} = 20,414 \text{ kHz}$$

Designsimulationen

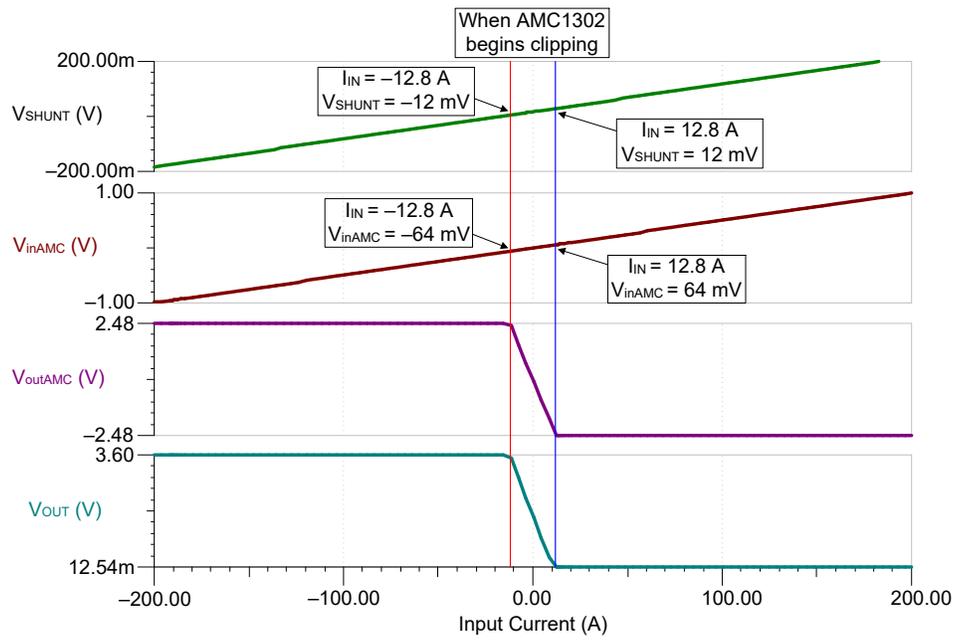
DC-Simulationsergebnisse

Die [Simulationsergebnisse](#) zeigen die simulierten DC-Eigenschaften der Spannung über den Shunt, den differentiellen Eingang/Ausgang des AMC1302 und den unsymmetrischen Ausgang des Verstärkers TLV9002 von -10 A bis 10 A .



Simulationsergebnisse

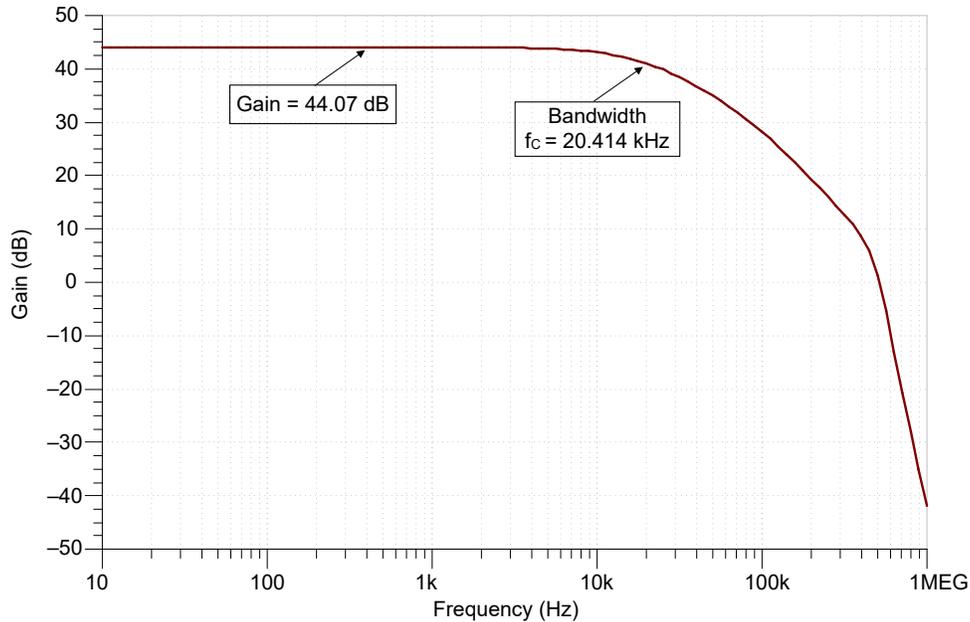
Die [DSimulation eines Kurzschlussereignisses](#) zeigt eine Simulation des Schaltkreises während eines Kurzschlussereignisses, indem gezeigt wird, wie die Ein- und Ausgänge bei $\pm 200\text{ A}$ reagieren. Die roten und blauen Linien, die durch die Diagramme gehen, markieren die Punkte, an denen der Ausgang des AMC1302 mit dem Clipping beginnt. Von diesem Punkt an besteht der Zweck der Schaltung darin, den Betrieb nach dem Kurzschlussereignis fortzusetzen. Im Abschnitt [Designschritte](#) wurden die Werte für Verstärkung und Shunt-Widerstand auf der Highside des AMC1302 gewählt, um Schäden während dieses Ereignisses zu vermeiden. In der folgenden Simulation werden diese Optionen validiert: Die maximale Eingangsspannung, die beim Kurzschlussereignis an den AMC1302 eintritt, beträgt $\pm 1\text{ V}$ und ist damit niedriger als die absoluten Grenzdaten des Bauteils. Daher bestätigt die Simulation, dass der Schaltkreis auch nach dem Kurzschlussereignis weiterarbeitet.



Simulation eines Kurzschlussereignisses

Ergebnisse der AC-Simulation im geschlossenen Regelkreis

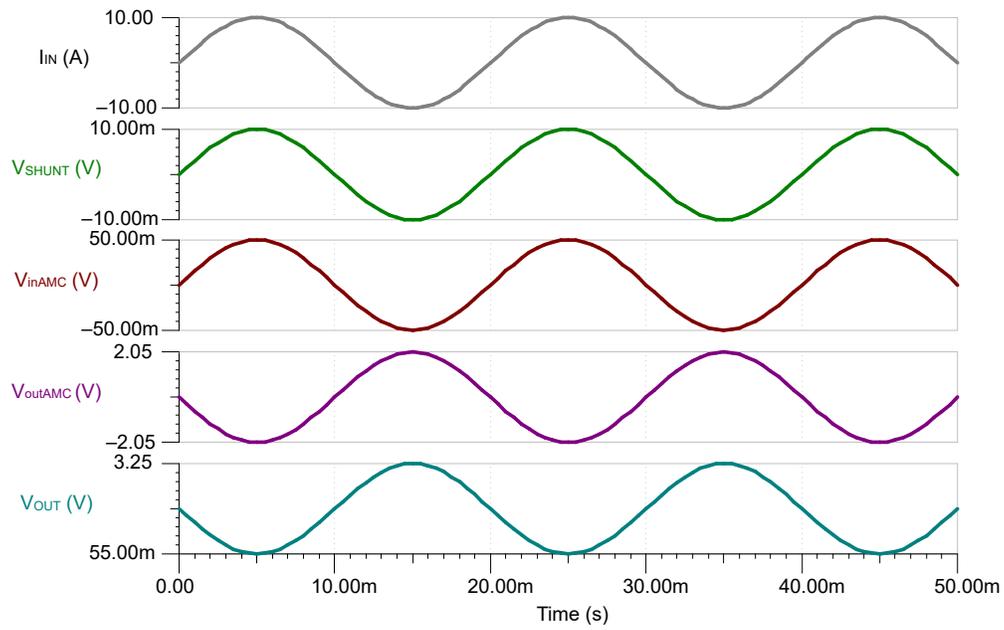
Die **AC-Simulation** zeigt die Wechselstromübertragungskennlinie des unsymmetrischen Ausgangs. Diese Simulation zeigt, welche Verstärkung (dB) zu erwarten ist, wenn die Frequenz dem mit der zweiten Gleichung in **Schritt 11** berechneten Grenzwert nähert und diesen überschreitet. Das analoge Frontend hat eine Verstärkung von 5 V/V, das AMC1302 eine Verstärkung von 41 V/V und die differenzielle zu-unsymmetrische Wandlung eine Verstärkung von 0,78 V/V. Dadurch ist eine Verstärkung von 44,07 dB zu erwarten, die in der folgenden Abbildung veranschaulicht wird.



AC-Simulation

Sinuswellen-Simulationsergebnisse

Die **Sinuswellen-Simulation** zeigt den Ausgang des Shunts, den differentiellen Eingang und Ausgang des AMC1302 und den unsymmetrischen Ausgang des TLV9002 als Reaktion auf ein Sinussignal mit einer Amplitude von -10 A bis 10 A . Der Differenzausgang des AMC1302 beträgt $\pm 2,05\text{ V}_{\text{pk-pk}}$ wie erwartet. Der unsymmetrische Ausgang beträgt $3,19\text{ V}_{\text{pk-pk}}$ und schwingt von 55 mV auf $3,245\text{ V}$.



Sinuswellen-Simulation

Designreferenzen

Weitere Informationen zur Umwandlung von differenziellen in unsymmetrische Ausgängen finden Sie in der umfassenden Schaltungsbibliothek von TI in [Analog Engineer's Circuit Cookbooks](#) und in der Anwendungsbeschreibung [Interfacing a Differential-Output \(Isolated\) Amp to a Single-Ended Input ADC](#).

Empfohlene isolierte Verstärker

AMC1302	
Arbeitsspannung	1500 V _{RMS}
Verstärkung	41 V/V
Bandbreite	TYP mit 280 kHz
Linearer Eingangsspannungsbereich	±50 mV
Eingangswiderstand	4,9 kΩ (Typ.)
Eingangs-Offsetspannungsdrift	±50 μV (max.), ±0,8 μV/ C (max.)
Verstärkungsfehler und Drift	±0,2 % (max.), ±35 ppm/Grad C (max.)
Nichtlinearität und Drift	0,03 % (max.), 1 ppm/Grad C (Typ.)
Isolierung transiente Überspannung	7071 V _{PEAK}
Hohe Gleichtakt-Transientenstörfestigkeit, CMTI	100 kV/μs (min.)

Design alternativer isolierter Verstärker

AMC3302	
Arbeitsspannung	1200 V _{RMS}
Verstärkung	41 V/V
Bandbreite	TYP mit 334 kHz
Linearer Eingangsspannungsbereich	±50 mV
Eingangswiderstand	4,9 kΩ (Typ.)
Eingangs-Offsetspannungsdrift	±50 μV (max.), ±0,5 μV/ C (max.)
Verstärkungsfehler und Drift	±0,2 % (max.), ±35 ppm/Grad C (max.)
Nichtlinearität und Drift	±0,03 % (max.), 1 ppm/Grad C (Typ.)
Isolierung transiente Überspannung	6000 V _{PEAK}
Hohe Gleichtakt-Transientenstörfestigkeit, CMTI	95 kV/US (min.)

AMC1202	
Arbeitsspannung	1000 V _{RMS}
Verstärkung	41 V/V
Bandbreite	TYP mit 280 kHz
Linearer Eingangsspannungsbereich	±50 mV
Eingangswiderstand	4,9 kΩ (Typ.)
Eingangs-Offsetspannungsdrift	±50 μV (max.), ±0,8 μV/ C (max.)
Verstärkungsfehler und Drift	±0,2 % (max.), ±35 ppm/Grad C (max.)
Nichtlinearität und Drift	±0,03 % (max.), 1 ppm/Grad C (Typ.)
Isolierung transiente Überspannung	4250 V _{PEAK}
Hohe Gleichtakt-Transientenstörfestigkeit, CMTI	100 kV/μs (min.)

WICHTIGER HINWEIS UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

TI STELLT TECHNISCHE UND ZUVERLÄSSIGKEITSDATEN (EINSCHLIESSLICH DATENBLÄTTER), DESIGNRESSOURCEN (EINSCHLIESSLICH REFERENZDESIGNS), ANWENDUNGS- ODER ANDERE DESIGNBERATUNG, WEB-TOOLS, SICHERHEITSMITTELSYSTEME UND ANDERE RESSOURCEN „WIE BESEHEN“ UND MIT ALLEN FEHLERN ZUR VERFÜGUNG, UND SCHLIESST ALLE AUSDRÜCKLICHEN UND STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN AUS, EINSCHLIESSLICH UND OHNE EINSCHRÄNKUNG ALLER STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN DER MARKTGÄNGIGKEIT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ODER DER NICHTVERLETZUNG VON RECHTEN.

Diese Ressourcen sind für qualifizierte Entwickler gedacht, die mit TI-Produkten entwickeln. Sie allein sind verantwortlich für (1) die Auswahl der geeigneten TI Produkte für Ihre Anwendung, (2) das Design, die Validierung und den Test Ihrer Anwendung und (3) die Sicherstellung, dass Ihre Anwendung die geltenden Normen sowie alle anderen Sicherheits-, regulatorischen und sonstigen Vorgaben erfüllt.

Diese Ressourcen können jederzeit und ohne Vorankündigung geändert werden. Sie erhalten von TI die Erlaubnis, diese Ressourcen ausschließlich für die Entwicklung von Anwendungen mit den in der Ressource beschriebenen TI-Produkten zu verwenden. Jede andere Vervielfältigung und Darstellung dieser Ressourcen ist untersagt. Es wird keine Lizenz für andere Rechte am geistigen Eigentum von TI oder an Rechten am geistigen Eigentum Dritter gewährt. TI übernimmt keine Verantwortung für und Sie schützen TI und seine Vertreter gegen Ansprüche, Schäden, Kosten, Verluste und Verbindlichkeiten, die sich aus Ihrer Nutzung dieser Ressourcen ergeben.

Produkte von TI werden gemäß den [Verkaufsbedingungen von TI](#) oder anderen geltenden Bedingungen bereitgestellt, die entweder auf [ti.com](#) verfügbar sind oder in Verbindung mit diesen TI-Produkten bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung dieser Ressourcen durch TI werden die geltenden Garantien oder Gewährleistungsausschlüsse von TI für TI-Produkte weder erweitert noch verändert.

TI widerspricht allen zusätzlichen oder abweichenden Bedingungen, die Sie möglicherweise vorgeschlagen haben, und lehnt sie ab.

Postanschrift: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

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