

# Analog Engineer's Circuit

## フロントエンドゲイン段を備えた絶縁型 電流センシング回路



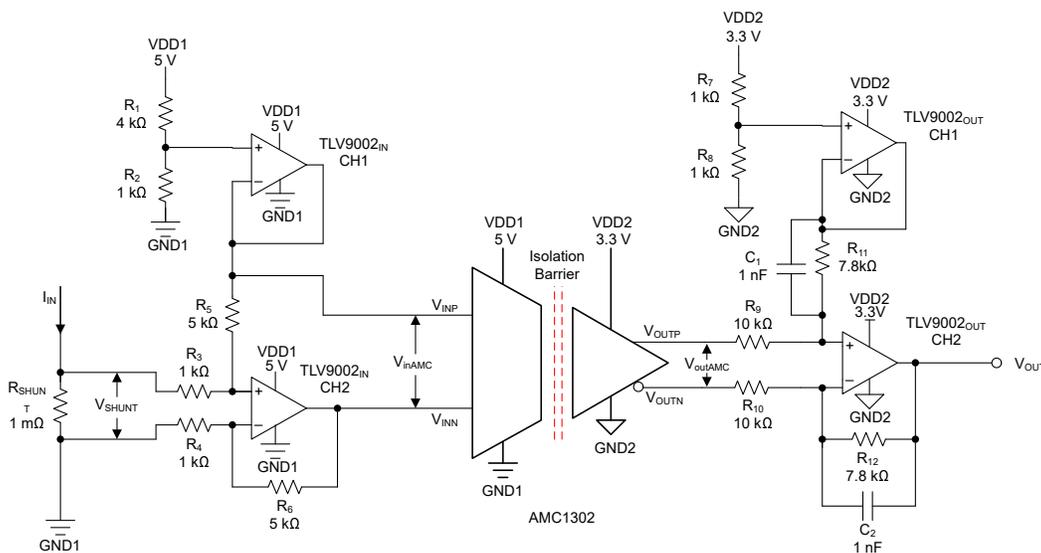
### Data Converters

#### 設計目標

電流源 (公称値)		電流源 (短絡)	入力電圧		出力電圧	電源	
$I_{IN\ MIN}$	$I_{IN\ MAX}$	$I_{SHORT}$	$V_{SHUNT,\ MIN}$	$V_{SHUNT,\ MAX}$	$V_{OUT}$	$V_{DD1}$	$V_{DD2}$
$\pm 10\text{mA}$	$\pm 10\text{A}$	$\pm 200\text{A}$	$\pm 10\mu\text{V}$	$\pm 10\text{mV}$	$55\text{mV}\sim 3.245\text{V}$	$5\text{V}$	$3.3\text{V}$

#### 設計の説明

サーキットブレーカなどの一部のアプリケーションには、小さい公称電流を測定すると同時に、高い短絡電流に耐性のある回路が必要です。この回路設計資料では、 $\pm 10\text{mA}\sim\pm 10\text{A}$  の公称負荷電流を正確に測定でき、最大  $\pm 200\text{A}$  の短絡電流に耐性のある絶縁型電流センシング回路について説明します。この回路の出力は、MSP430 に統合されているような  $3.3\text{V}$  のシングルエンド ADC で使用されることを想定しています。測定対象のライン電流と ADC との絶縁には、絶縁アンプ (AMC1302) を使用します。1mΩ シャント抵抗を使用すると、予測される最小公称電流から  $\pm 10\mu\text{V}$  の信号が生成されます。デルタシグマ変調器にはデッドゾーンがあるため、この信号はゼロ付近の電圧入力を正しく解決するには小さすぎます。この問題を解決するため、この回路は 2 チャンネルのオペアンプ (TLV9002) を使用して、信号を  $5\text{V/V}$  のゲインで増幅し、同相電圧を  $1\text{V}$  に設定します。これにより、最小公称電流がデッドゾーン外になるだけでなく、最大公称電流が上昇して絶縁アンプのフルスケールの線形入力範囲に一致ようになります。絶縁アンプのフルスケールの線形入力範囲は  $\pm 50\text{mV}$  で、差動出力スイングは  $\pm 2.05\text{V}$ 、出力同相電圧は  $1.44\text{V}$ 、固定内部ゲインは  $41\text{V/V}$  です。絶縁アンプの出力側では、2 番目の 2 チャンネル オペアンプ (TLV9002) を使用します。最初のチャンネルはシングルエンドの同相電圧を  $1.65\text{V}$  に設定し、2 番目のチャンネルは絶縁アンプからの差動出力信号を  $3.3\text{V}$  のシングルエンド ADC で使用可能なシングルエンド信号に変換します。



## デザインノート

- 絶縁アンプとしては、低消費電力、高分解能、 $\pm 50\text{mV}$  の広いフルスケール入力電圧範囲を持つことから、AMC1302 が選択されています。
- オペアンプとしては、低コスト、低オフセット、小型、デュアルチャネルであることから TLV9002 が選択されています。
- TLV9002<sub>IN</sub>、TLV9002<sub>OUT</sub>、AMC1302 に電源を供給する VDD1 と VDD2 には、低インピーダンス、低ノイズのソースを選択します。この電源ソースは、シングルエンド出力の同相電圧の設定にも使用されます。
  - VDD1 は GND1 を基準としており、VDD2 は GND2 を基準としています。
- 最高の精度を求める場合は、温度係数の小さい高精度シャント抵抗を使用してください。
- シャント抵抗は、予測される公称入力電流および短絡入力電流のレベルに適合するように選択します。
  - 連続動作の場合は、IEEE 規格に従って、通常の条件下では定格電流の 2/3 を超える電流でシャント抵抗を動作させないでください。消費電力の要件が厳しいアプリケーションでは、シャント抵抗をさらに減らすか、定格ワット数を増やす必要がある場合もあります。
  - 短絡電流については、シャント抵抗のデータシートで短期的な過負荷の仕様を確認してください。この電流は多くの場合、公称消費電力の 5 倍です。
  - 消費電力の計算方法については、『[絶縁型アンプ電流センシング Excel カリキュレータ](#)』を参照してください。
- 適切な分圧抵抗値を使用して、TLV9002<sub>IN</sub> と TLV9002<sub>OUT</sub> 両方のチャンネル 1 の同相電圧を設定します。絶縁型アンプの入力同相仕様に違反しないことを確認してください。
- シングルエンド出力が適切な出力スイングになるように、TLV9002<sub>OUT</sub> のチャンネル 2 のゲイン設定抵抗に適切な値を選択します。

## 設計手順

- 公称電流の最大値に基づいて、適切なシャント抵抗値を決定します。

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

- このシャント抵抗は 200A の短絡電流に耐えられることが必要であるため、シャント抵抗の値をさらに 1/5 に低減できます。これは[手順 6](#) で補償されます。最大公称電流動作時のシャント抵抗の消費電力を決定します。

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

最小公称電流動作時のシャント抵抗の消費電力を決定します。

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

- 短絡時のシャント抵抗の消費電力を決定します。選択した短期過負荷仕様 (通常は公称値の 5 倍) が、短絡による消費電力に耐えられることを確認してください。

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

消費電力を 1/5 に低減したシャント抵抗を選択します。短期過負荷要件が 40W の場合、シャント  $P_{dissipation}$  は 8W です。詳細については、『[絶縁型電流センシングの設計上の考慮事項](#)』アナログ設計ジャーナルを参照してください。

- TLV9002<sub>IN</sub> のチャンネル 1 を使用して、TLV9002<sub>IN</sub> のチャンネル 2 のシングルエンド出力の同相電圧 2.5V を設定します。チャンネル 1 の 1V 出力も、AMC1302 の正入力に供給されます。5V 電源の場合、単純な分圧抵抗を使用して 5V を 1V に分圧できます。 $R_1$  に 4k $\Omega$  を使用すると、 $R_2$  は次の式で計算できます。

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

5. TLV9002<sub>IN</sub> のチャンネル 2 を使用してシャント抵抗からの電圧を増幅し、最大公称電流範囲を測定する際に AMC1302 のフルスケール入力電圧範囲が使用されるようにします。シャント抵抗が 1mΩ で、最大公称電流が ±10A の場合、シャント抵抗からの出力電圧は ±10mV です。AMC1302 の最大入力電圧は ±50mV なので、シャント抵抗の出力を 5V/V で増幅する必要があります。R3|R4 を 1kΩ に維持した場合、R5|R6 の抵抗値は次の式で計算できます。

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

6. 選択したシャント抵抗に基づいて、短絡時に AMC1302 の入力の絶対最大電圧制限に違反しないことを確認します。短絡電流が 200A の場合、AMC1302 には 1V の差動電圧が印加されます。入力同相モードは 1V に設定されているため、AMC1302 の負の入力には、GND1 を基準として最大 2V が印加されます。

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

AMC1302 の絶対最大入力電圧は、ハイサイド電源電圧より 500mV 高くなります (『AMC1302 高精度、±50mV 入力、強化絶縁型アンプ』データシートに記載)。5V のハイサイド電源電圧では、入力電圧の絶対最大定格に違反しません。

7. TLV9002<sub>OUT</sub> のチャンネル 1 を使用して、TLV9002<sub>OUT</sub> のチャンネル 2 のシングルエンド出力の同相電圧 1.65V を設定します。3.3V 電源の場合、単純な分圧抵抗を使用して 3.3V を 1.65V に分圧できます。R<sub>7</sub> に 1 kΩ を使用すると、R<sub>8</sub> は次の式で計算できます。

$$R_8 = \frac{V_{CM} \times R_7}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.65 \text{ V} \times 1000 \Omega}{3.3 \text{ V} - 1.65 \text{ V}} = 1000 \Omega$$

8. TLV9002 はレールツーレールのオペアンプですが、TLV9002 の出力は電源レールから 55mV までしかスイングできません。このため、TLV9002<sub>OUT</sub> のシングルエンド出力は 55mV ~ 3.245V (3.19V<sub>pk-pk</sub>) までスイングできます。
9. AMC1302 の V<sub>OUTP</sub> および V<sub>OUTN</sub> 出力は 2.05V<sub>pk-pk</sub> で、180 度の位相差があり、同相電圧は 1.44V です。したがって、差動出力は ±2.05V (4.1V<sub>pk-pk</sub>) です。

TLV9002<sub>OUT</sub> の出力制限内に維持するには、AMC1302 の出力を 3.2/4.1 の係数で減衰させる必要があります。R<sub>9</sub> = R<sub>10</sub>、R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> の場合、R<sub>11</sub> と R<sub>12</sub> の計算には、次に示す差動からシングルエンドへの段の伝達関数を使用できます。

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

10. 前に計算した TLV9002<sub>OUT</sub> の出力スイングを使用し、R<sub>9</sub> と R<sub>10</sub> を 10kΩ とすると、R<sub>11</sub> と R<sub>12</sub> は次の式で 7.8kΩ と計算できます。

$$3.2 = (2.465 \text{ V} - 415 \text{ mV}) \times \left( \frac{R_{11,12}}{10 \text{ k}\Omega} \right) + 1.65$$

標準の 0.1% 抵抗値を使用する場合、7.8kΩ 抵抗を使用できます。これにより、TLV9002 の制限内で最大出力スイングが得られます。

11. コンデンサ C<sub>1</sub> および C<sub>2</sub> は、抵抗 R<sub>11</sub> および R<sub>12</sub> と並列に配置して、高周波信号を制限します。R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub>、C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> の場合、カットオフ周波数は次の式で計算できます。

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

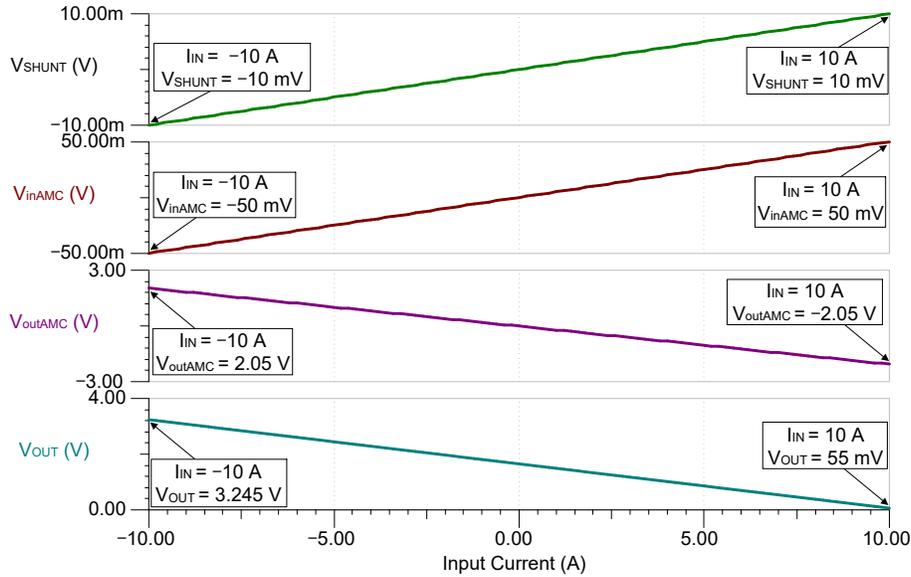
C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> = 1nF、R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> = 7800Ω の場合、カットオフ周波数は 20.414kHz と計算できます。

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 7800 \Omega \times 1 \text{ nF}} = 20.414 \text{ kHz}$$

## 設計シミュレーション

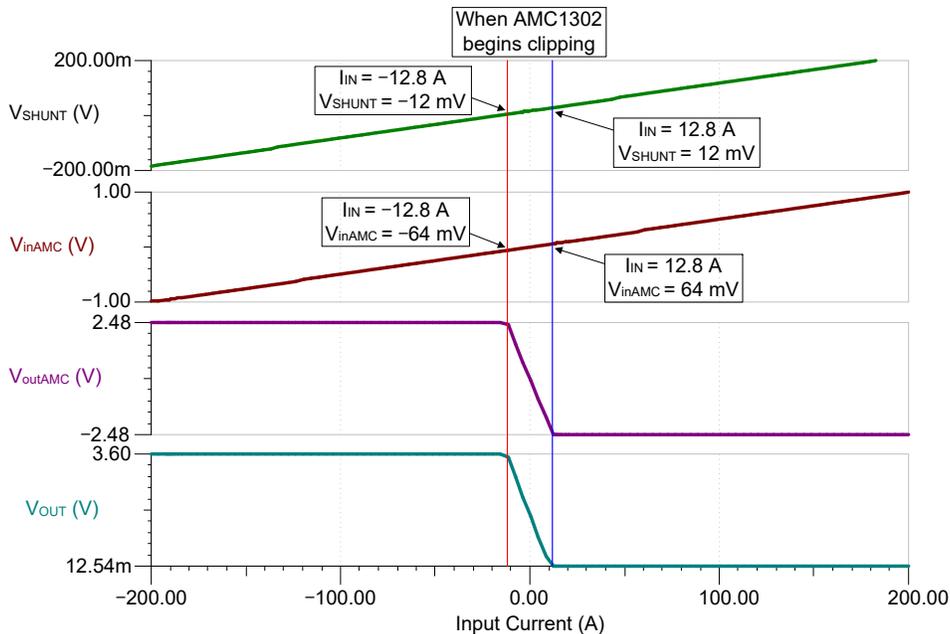
### DC シミュレーション結果

シミュレーション結果は、シャントの両端の電圧、AMC1302 の差動入力 / 出力、TLV9002 アンプのシングルエンド出力を  $-10A \sim 10A$  でシミュレートした DC 特性を示します。



シミュレーション結果

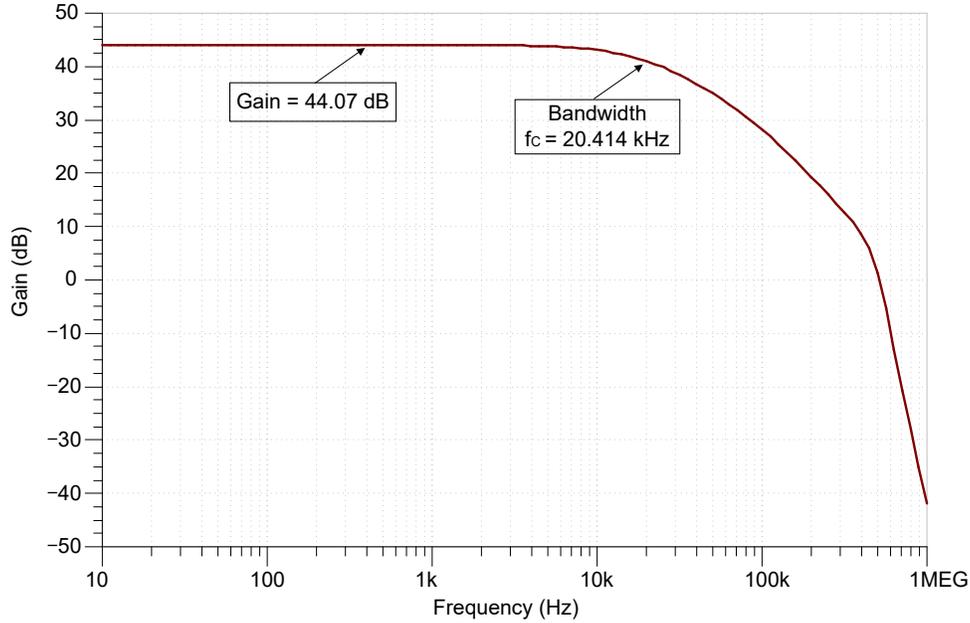
短絡イベントシミュレーションは、短絡イベント発生時の回路シミュレーションの結果で、 $\pm 200A$  時に入出力がどのように応答するかを示します。すべてのグラフを貫く赤と青の線は、AMC1302 の出力がクリッピングを開始するポイントを示しています。回路の目的は、短絡イベントが発生した後も動作を継続することです。「設計手順」セクションでは、AMC1302 のハイサイドのゲインとシャント抵抗の値は、このイベント中の損傷を回避するように選択されています。以下のシミュレーションは、これらの選択を検証しています。短絡イベントが発生したときに AMC1302 に入力される最大入力電圧は  $\pm 1V$  で、部品の絶対最大定格を下回っています。したがって、シミュレーションにより、短絡イベントが発生した後も回路が動作を継続することが確認されました。



短絡イベントのシミュレーション

## 閉ループの AC シミュレーション結果

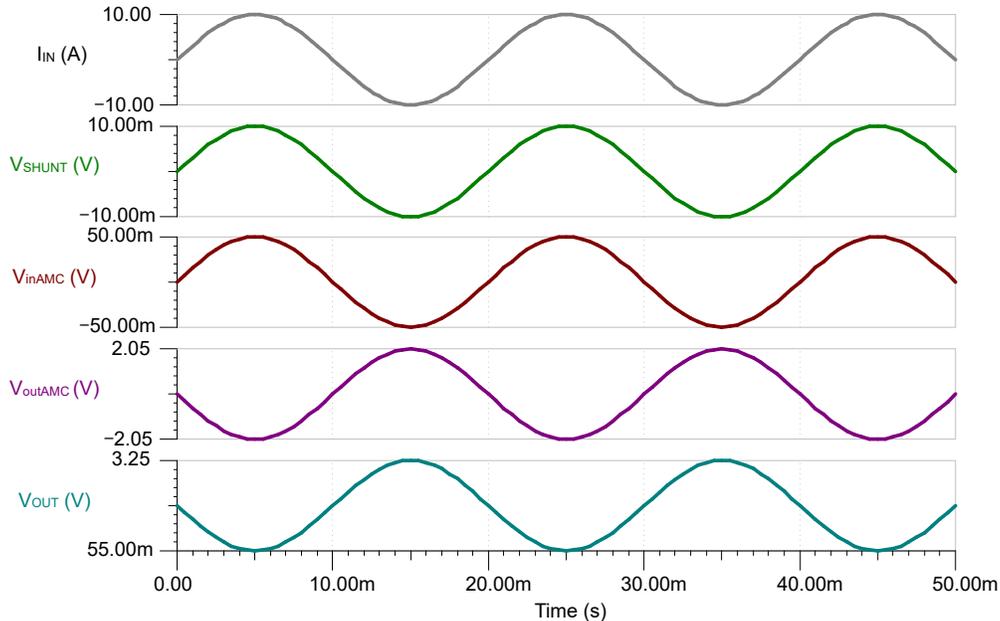
**AC シミュレーション**は、シングルエンド出力の AC 伝達特性を示します。このシミュレーションは、周波数が手順 11 の 2 番目の式で計算されたカットオフに近づき、上回るときに予測されるゲイン (dB) を示しています。アナログフロントエンドのゲインは 5V/V、AMC1302 のゲインは 41V/V、差動からシングルエンドへの変換のゲインは 0.78V/V なので、次の図に示す 44.07dB のゲインが予測されます。



AC シミュレーション

## 正弦波のシミュレーション結果

**正弦波のシミュレーション**は、シャントの出力、AMC1302 の差動入力と差動出力、振幅 -10A~10A の正弦波にตอบสนองする TLV9002 のシングルエンド出力を示しています。AMC1302 の差動出力は予測どおり  $\pm 2.05V_{pk-pk}$  です。シングルエンド出力は  $3.19V_{pk-pk}$  で、スイングは 55mV~3.245V です。



正弦波シミュレーション

## 設計の参照資料

テキサス・インスツルメンツの包括的な回路ライブラリについては、『アナログ エンジニア向け回路クックブック』、差動からシングルエンドへの出力変換の詳細については、『差動出力 (絶縁型) アンプからシングルエンド入力 ADC の接続』アプリケーション ブリーフを参照してください。

## 設計に使用されている絶縁アンプ

AMC1302	
動作電圧	1500V <sub>RMS</sub>
ゲイン	41V/V
帯域幅	280kHz (標準値)
線形入力電圧範囲	±50mV
入力抵抗	4.9kΩ (標準値)
入力オフセット電圧とドリフト係数	±50μV (最大値)、±0.8μV/°C (最大値)
ゲイン誤差とドリフト係数	±0.2% (最大値)、±35ppm/°C (最大値)
非線形性とドリフト係数	0.03% (最大値)、1ppm/°C (標準値)
絶縁過渡過電圧	7071V <sub>PEAK</sub>
同相過渡耐性、CMTI	100kV/μs (最小値)

## 代替絶縁型アンプ

AMC3302	
動作電圧	1200V <sub>RMS</sub>
ゲイン	41V/V
帯域幅	334kHz (標準値)
線形入力電圧範囲	±50mV
入力抵抗	4.9kΩ (標準値)
入力オフセット電圧とドリフト係数	±50μV (最大値)、±0.5μV/°C (最大値)
ゲイン誤差とドリフト係数	±0.2% (最大値)、±35ppm/°C (最大値)
非線形性とドリフト係数	±0.03% (最大値)、1ppm/°C (標準値)
絶縁過渡過電圧	6000V <sub>PEAK</sub>
同相過渡耐性、CMTI	95kV/μs (最小値)

AMC1202	
動作電圧	1000V <sub>RMS</sub>
ゲイン	41V/V
帯域幅	280kHz (標準値)
線形入力電圧範囲	±50mV
入力抵抗	4.9kΩ (標準値)
入力オフセット電圧とドリフト係数	±50μV (最大値)、±0.8μV/°C (最大値)
ゲイン誤差とドリフト係数	±0.2% (最大値)、±35ppm/°C (最大値)
非線形性とドリフト係数	±0.03% (最大値)、1ppm/°C (標準値)
絶縁過渡過電圧	4250 V <sub>PEAK</sub>
同相過渡耐性、CMTI	100kV/μs (最小値)

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated