

Design Guide: TIDA-010987

ロゴスキーコイル電流センサのリファレンス デザイン

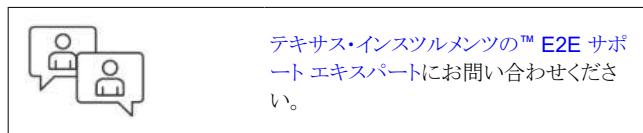


説明

このリファレンス デザインでは、エンド ユーザーは幅広い電流センシング アプリケーション向けに、サイズや感度が異なる PCB ロゴスキーコイルを評価できます。このデザインは、最大 500A の小電流 / 大電流測定、0.2% での高精度、1MHz を上回る広帯域幅センシングをサポートします。このデザインは、これらの機能を複数の電流センシング アプリケーションとの互換性を持つ単一のプラットフォームに統合しています。

リソース

TIDA-010987	デザイン フォルダ
ADS131M08MET-EVM	デザイン フォルダ
TIDA-010971, TIDA-010986	デザイン フォルダ
INA333, TLV9002, TLV2387	プロダクト フォルダ
LOG300, TL081H, LM2664	プロダクト フォルダ

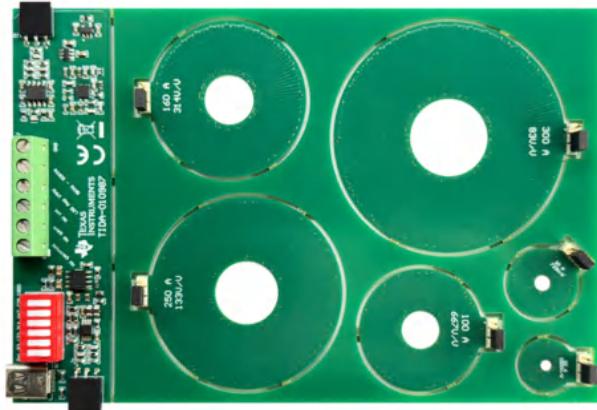
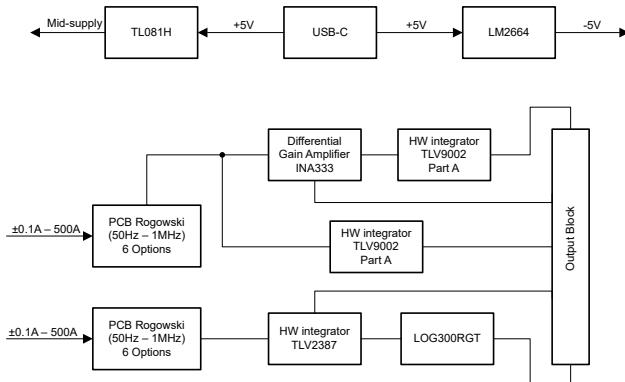


特長

- 複数のアプリケーション評価に適した、複数のコンポーネントシーケンスによるシグナル コンディショニング
- 広い電流範囲:
 - ゲイン設定により 0.1A ~ 500A で調整可能
- さまざまなコイル サイズ:
 - ボードには、サイズの異なる 6 個のコイルが付属しています
- 使いやすくプラグインのフォーム ファクタで、半田付けは不要です

アプリケーション

- 電気メータ
- AC 充電(パイル)ステーション
- DC 高速充電ステーション
- AFCI サーキットブレーカ
- 産業用 サーキットブレーカ (MCCB, ACB, VCB)



1 システムの説明

TIDA-010987 リファレンス デザインにより、幅広い電流センシング アプリケーションで PCB にロゴスキーコイルを使用できます。電流センサは、最新の電源システムや電子デバイスに不可欠な部品であり、e メーター、電力品質分析、回路保護などの分野で高精度の監視と保護を実現します。これらのセンサは、過負荷を検出し、消費電力を追跡し、制御システムにフィードバックを提供することで、安全で効率的な動作を実現します。

ロゴスキーコイルは、広帯域、広い電流範囲でのリニア応答、持ち前の安全性という特長から、これらのアプリケーションに適しています。磁性コア センサ (CTs) のようにコイルは飽和しません。このコイルは e メーターで一般的に使用され、正確な課金や、高周波の障害電流を高速で検出するサーキットブレーカに使用されます。また、このコイルは、太陽光システムや風力システムや産業用機器でパワー コンバータにも活用できます。産業用機器では、高精度の電流波形測定が求められます。

TIDA-010987 のリファレンス デザインには、さまざまな使用事例に合わせて効果的なシグナル コンディショニングを行うため、複数の部品構成が組み込まれています。たとえば、この設計では、高精度アンプとその後にハードウェア積分器を採用して、高精度の性能と、低周波数アプリケーションのサポートの両方を実現しています。効果的なレイアウトにより、必要なシグナル コンディショニング回路に加えて、さまざまなサイズのコイルを 1 つの PCB に配置できるため、コンパクトで統合されたリファレンス デザインを実現できます。

このリファレンス デザインは、多くの電流センシング アプリケーションにおいてロゴスキーコイル テクノロジーの評価を必要とするエンジニアやシステム設計者に特に役立ちます。このデザインでは、コイルの形状とシグナル コンディショニング段において柔軟性を提供することで、実際の条件下で、感度、帯域幅、ノイズ挙動などの性能指標を迅速に比較できます。このデザインは、デモ プラットフォームとして活用できるほか、ロゴスキーコイルを次世代の電流センシング方式に統合するための開発ツールとしても活用できます。

2 システム概要

TIDA-010987 リファレンス デザインは、幅広いアプリケーションで高精度電流測定を行うための多目的 PCB ロゴスキーコイル プラットフォームを実現します。このシステムは、複数のコイル サイズ、高精度アンプ、差動シグナル コンディショニング、ハードウェア積分器を 1 つのコンパクトなボードに統合しており、フレキシブルでスケーラブルな使用事例を実現できます。

TIDA-010987 リファレンス デザインは、電流測定アプリケーションに適したいくつかの主な利点を提供します。

- コンパクトな PCB フォーム ファクタで、複数のコイル サイズとシグナル コンディショニング回路を 1 つのリファレンス デザインに統合。
- 大型の電流トランスとシャント抵抗の代わりとなる、コスト効率に優れた代替品。
- 飽和や磁気改ざんへの耐性があり、産業用とパワー エレクトロニクスの各環境で高い堅牢性を実現。
- 1 枚のボード上で複数の電流センシングの使用事例に対応できるデザインを採用し、設計期間の短縮、評価における柔軟性の向上を実現。

2.1 ブロック図

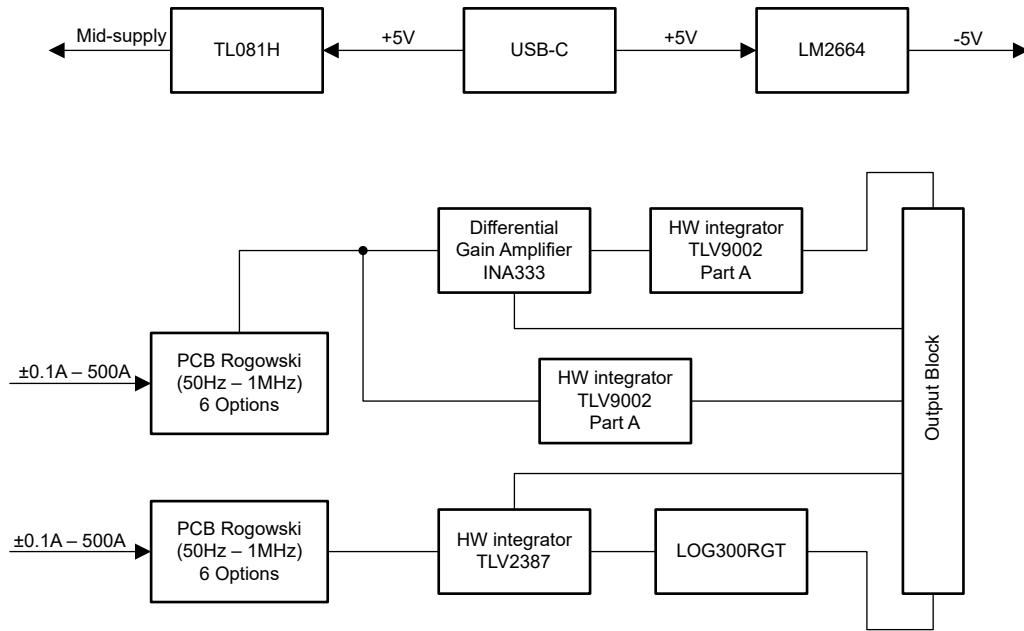


図 2-1. TIDA-010987 のブロック図

2.1.1 PCB ロゴスキーコイル

TIDA-010987 リファレンス デザインには、6 種類の異なるサイズの PCB ロゴスキーコイルが組み込まれており、それぞれプリント基板上に差動巻線として注意深くレイアウトされています。このデザインは、Python® をベースとする自動スクリプトを活用して人為的ミスを最小限に抑え、コイルの精度とノイズ除去に不可欠な正確な対称性を実現します。このアプローチは、製造における再現性を向上させるだけでなく、プロトタイプと量産ユニット間で一貫したコイル性能を提供します。

各コイルには、測定可能な最大電流定格と、コンディショニング回路に関連するゲイン要件が明確にラベル付けされています。このラベルにより、エンドユーザーは、住宅用メーターで低レベルの電流を測定する場合や、産業用保護システムで大電流に対応する場合など、アプリケーションに最適なコイルを簡単に識別して選択できるようになります。ラベルと標準化されたフォーム ファクタにより、推測作業が不要になり、実際の条件下でロゴスキーコイルを評価する必要があるエンジニアには非常に実用的な設計となっています。

この実装の主な利点は、ユーザー フレンドリーなプラグイン アーキテクチャです。半田付けまたは外部コネクタ (ジャンパーケーブル) が必要な従来のロゴスキーコイルの設定とは異なり、TIDA-010987 はパンチアウトおよびプラグインのフォーム ファクタです。エンジニアはボードの再作業やセットアップの再構成なしで、コイルのサイズを迅速に変更できるため、評価とプロトタイプ製作時間を大幅に短縮できます。モジュール性が高いので、研究開発ラボ、学術的な環境、特定の電流センシング課題について複数のコイル形状を比較する製品チームにとって、このデザインは特に便利です。

2.1.2 積分ステージ

ロゴスキーコイルの出力で誘導される電圧 (VS) は、一次導体に流れる電流の変化率 (IP) に比例します。出力電圧は 90° の位相シフトを持っており、正弦波入力電流の場合には入力から遅れます。ロゴスキーコイルの出力は瞬間的な 1 次側電流の微分に比例するため、元の電流信号を取得するには積分器が必要です。出力電圧は線形であり、電流測定のみを必要とするアプリケーションには統合されていなくても使用できます。電力の測定が必要なアプリケーションでは、電流と電圧の位相差が重要で、ロゴスキー電流センサ出力の位相シフトが必要です。位相シフトは、積分器を使用して実施します。ロゴスキー積分器は、次の二つの方法で実装できます。

- デジタル (ソフトウェア) の統合: 周波数ドメインに積分を行うと、-20dB/ディケードの減衰と 90 度の一定の位相シフトが得られます。位相角補正は、位相および振幅応答を精密に制御できるデジタル処理によって、大幅に精度が向上しました。高精度のデジタル統合を実現するには、高性能マイコン (MCU) と、デジタル フィルタを実装した A/D コンバータ (ADC) が必要です。デジタル フィルタの実装が複雑なため、処理の遅延が起動中に発生します。デジタル フィルタは、システム内の MCU と ADC によって実行されます。

- ハードウェア統合: ハードウェア積分器を使用して、ロゴスキーカー電流センサの位相シフトを補正することもできます。位相補正是、抵抗とコンデンサを用いたパッシブ積分回路、またはオペアンプと受動部品を組み合わせたアクティブ積分回路によって実現できます。このリファレンス デザインは、有効な温度範囲で使用できる、安定したオペアンプベースのアクティブ積分器を実装しています。適切に設計されたハードウェア積分器は 90° の位相シフトをもたらしますが、実用的な制限によって位相誤差や精度の誤差が発生する可能性があります。部品を注意深く選択することで、位相誤差の変動を最小限に抑えます。

ロゴスキーカーの出力、特に PCB ロゴスキーカーの出力は非常に低い値 ($10\mu\text{V}/\text{A} \sim 100\mu\text{V}/\text{A}$) です。たとえば 100mA のように電流が小さい場合、出力が小さいことが課題になります。コイル感度に応じて、信号を ($100\text{V}/\text{V} \sim 500\text{V}/\text{V}$) で増幅する必要があります。アクティブ積分回路はアッテネータとして機能し、電流波形を 90° シフトします。Low 入力信号を減衰すると、信号が ADC のノイズフロアに達するところで信号が非常に低くなるため、精度が低下します。目的の周波数 ($50\text{Hz} \sim 60\text{Hz}$) で積分減衰をキャンセルするには、積分器のゲインをユニティゲインに設定する必要があります。ゲイン 1 で 90 度の位相シフトと位相シフトを実現するには、受動部品を正しく計算し、演算操作に適した種類の部品を使用する必要があります。ディスクリート アプローチでは、高精度アプリケーションには薄膜抵抗と C0G および NP0 コンデンサを推奨します。

2.1.3 入力段

ロゴスキーカーは、電流ではなく電流変化率を測定する dI/dt センサです。その結果、ロゴスキーカーは、高速な過渡ノイズやスイッチングノイズに対して、特に電流波形のゼロクロスポイント付近で非常に敏感になります。ゼロ交差時に、電流 (I) は瞬間にゼロになり、コイルの出力で急激な電圧スパイクと高周波リギングが発生します。ゼロクロススパイクとリギングは、信号に歪みを生じさせ、シグナルチェーンに非線形性をもたらす可能性があります。ゼロ交差の問題と非線形性に対処するため、差動アンプの入力にローパスフィルタを実装します。ローパスフィルタの目的は、不要なスパイクやリギングなどの高周波成分を減衰させることです。これによって、シグナルインテグリティが向上し、システムの直線的な動作を実現できます。

2.1.4 差動アンプ段

コイルからの信号は非常に小さいため、ADC の入力信号を改善するためにゲイン増幅ステージが必要です。INA333 はゲインステージとして選択されます。理由は、低出力ノイズ、高い CMMR、高ゲイン設定で帯域幅が広いことから、測定アプリケーションだけでなくさまざまなアプリケーションに柔軟に対応できるようになっているためです。このアンプは、ゲインを設定するために単一の抵抗を使用するので、エンドユーザーはコストを削減できます。

2.1.5 広帯域、低ノイズのアンプ段

2.1.5.1 ハイブリッド積分器

この段では、アクティブ積分とパッシブ積分を組み合わせて使用しています。パッシブフィルタはアクティブフィルタよりも前にあり、アンプを飽和させる可能性のある高周波スパイクとリギングを低減します。アクティブ積分器のゲインは 2,676、コーナー周波数は 1048Hz です。この設定により、 2.8MHz でゲインクロスオーバー周波数が生じます。選択したゲインパッシブフィルタ抵抗値は 210Ω であり、積分を継続するために、 2.8MHz のコーナー周波数としてコンデンサを選択します。

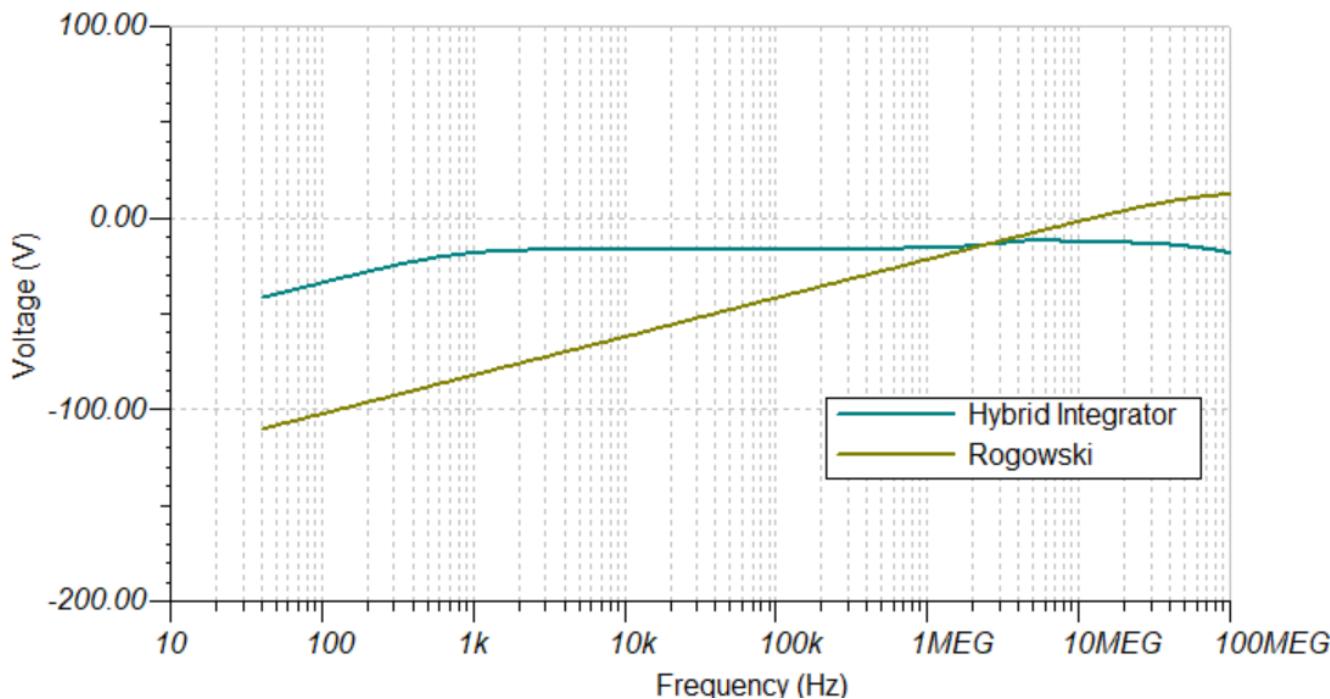


図 2-2. ハイブリッド積分器と PCB ロゴスキーオの TINA シミュレーション

2.1.5.2 バンドパスフィルタ

アーケ障害検出など一部のアプリケーションでは、目的の信号の分離に特定の周波数帯域のフィルタリングが役立ちます。この設計には 5kHz ~ 50kHz のバンドパスフィルタがあり、フィルタのハイパス部分とローパス部分を構築する RC ペアを変更することで調整できます。5kHz の周波数を選択したのは、一般に 60Hz の負荷で 5kHz 未満の高調波があるためです。たとえば、代表的な AC ブラシ付きモーターは、1kHz ~ 4kHz 前後の回転数 (RPM) で動作します。

2.1.5.3 ログアンプ

LOG300 は、調節可能なフィルタ処理入力により 98dB のダイナミックレンジを検出できる対数出力を提供する広帯域 AFE (40MHz) です。ゲインを設定することで、このデザインでは μA から A の電流信号を測定できます。このアンプは信号を処理するのに高速 ADC とデジタル信号プロセッサ (DSP) を使用せずに高周波のアーケ放電信号を検出できるため、アーケ検出にも役立ちます。

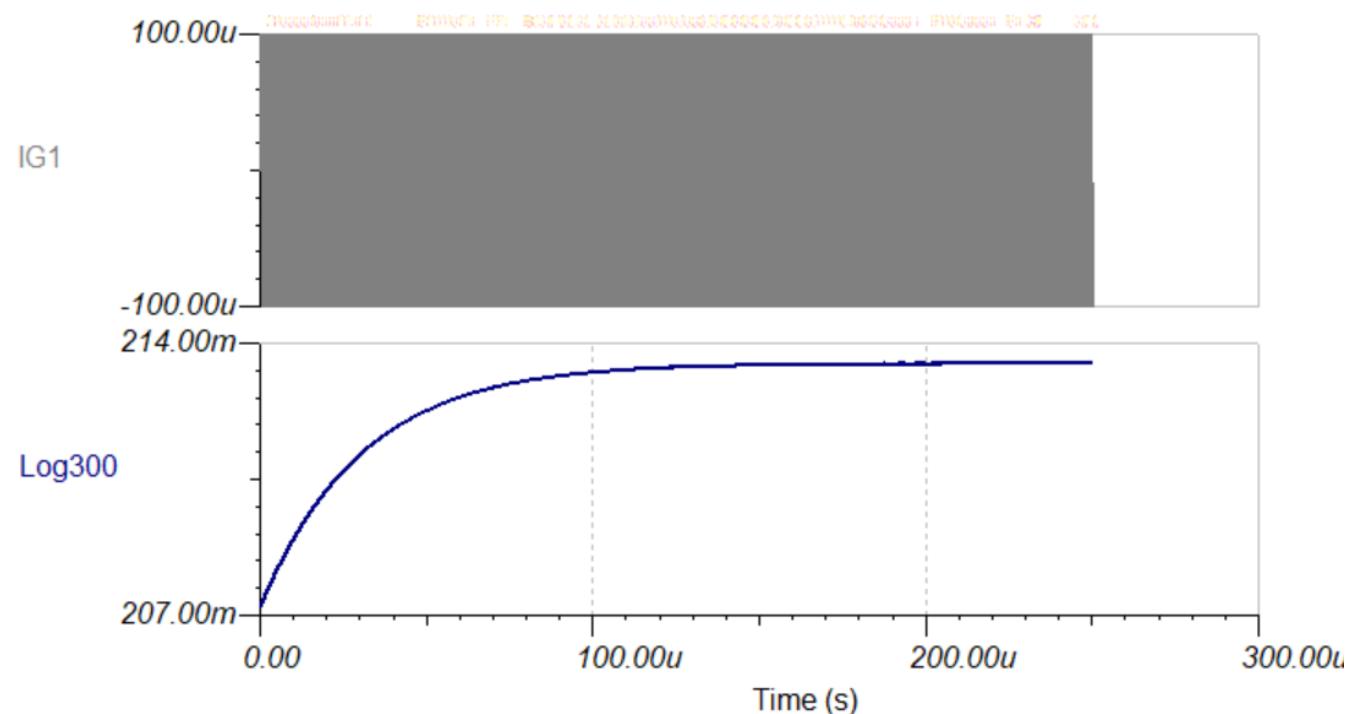


図 2-3. LOG300 と PCB ロゴスキー 100A、1MHz 正弦波入力の TINA シミュレーション

2.2 設計上の考慮事項

2.2.1 部品選定

システム ゲインは、差動アンプのゲインステージ (INA333)、アンプ段の後の積分器段、スタンドアロン積分器の 3 つの異なる段で制御できます。ゲインの選択は、アプリケーションによって大きく影響されます。

一部のアプリケーションでは、電流が 1kA を超える保護を目的として、大きい振幅の電流を測定可能な値に降圧する必要があります。高精度測定が不可欠な保護アプリケーションでは、電流をゲイン アンプが信号を増幅する mV の範囲まで降圧します。積分器 (減衰に設定) は、高精度測定のためにシステム内のすべてのノイズを減衰させます。

このデザインでは、ロゴスキーコイルの種類と感度に応じて、1V/V ~ 1000V/V の範囲の複数のゲイン設定があります。ここでは、積分器のゲインが複数の部品構成でユニティ ゲインに設定されます。

2.2.2 RC 部品の選定

このリファレンス デザインは、低位相誤差、低ノイズ、高速セトリング、高精度測定、高周波など、さまざまな部品構成においてさまざまな機能を対象としています。低位相誤差を目標とするために、30ms 未満の RC 時定数を選択します。積分器のセトリング タイムが 30ms になるように、100kΩ 抵抗と 0.3μF コンデンサを選択します。許容誤差が小さく ($\pm 5\%$ 未満)、温度ドリフトが小さい積分器コンデンサを選択します。C0G および NP0 コンデンサは優れた周波数応答と温度安定性を備えています。この設計で使用されている抵抗の許容誤差は $\pm 0.1\%$ 、精度と再現性を向上させるための薄膜材料で、システムに追加のノイズが発生しません。

スタンドアロン積分器の場合、ユニティ ゲインとより優れた周波数応答でより高速なセトリング タイム (10ms) を実現するために、470kΩ 抵抗と 100nF コンデンサを選択します。

2.2.3 ゲイン設定

ゲインアンプは、1つの抵抗 (RG) のみを使用して、ゲインの選択を制御します。抵抗 RG は、INA333 デバイスのピン 1 とピン 8 に接続します。ピン 1 とピン 8 の間のライン容量を低減するため、この抵抗はアンプのピンにできるだけ近づけて配置します。[式 1](#) に従って、アンプ ゲインを正しく設定してください。

$$S \times I_{max} \times G_s = L \quad (1)$$

ここで、

- S = コイルの感度 (μV 単位で測定)
- I_{max} = 導体を流れる最大電流
- L = ADC のアナログ入力ピンの制限
- G_s = システムのゲイン

$$G_s = Gain_{amp} \times Gain_{int} \quad (2)$$

ここで、

- ゲイン $Gain_{amp} = 1 + (100k\Omega / RG)$
- ゲイン $Gain_{int} = (RF/RI) \times 1/\sqrt{1 + 2\pi \times F \times RF \times C}$

[式 3](#) に、スタンドアロン積分器のゲインを設定する場合の伝達関数を示します。

$$\frac{\sqrt{(1 + 2 \times \left(\frac{RF}{RI}\right))^2 + (4 \times \pi \times RF \times F \times C)^2}}{\sqrt{(1 + (2 \times \pi \times RF \times F \times C)^2) \times (1 + (2 \times \pi \times RI \times F \times C)^2)}} \quad (3)$$

2.3 主な使用製品

2.3.1 INA333

INA333 デバイスは、優れた精度を提供する、低消費電力 高精度の計測アンプです。このデバイスは、多用途の 3 オペアンプ設計、小さいサイズ、低消費電力という特長を備えているため、幅広い携帯用アプリケーション向けの理想的な選択肢です。単一の外付け抵抗により、1~1000 の範囲で任意のゲインを設定できます。INA333 は、次のような業界標準のゲイン計算式を使用するように設計されています。 $G = 1 + (100k\Omega / RG)$ 。INA333 デバイスは、 $G \geq 100$ において $25\mu V$ と非常に低いオフセット電圧、同じく $G \geq 100$ において $0.1\mu V/\text{°C}$ と優れたオフセット電圧ドリフト、さらに $G \geq 10$ において 100 dB の高い同相除去比を提供します。このデバイスは最低 $1.8V (\pm 0.9V)$ の電源で動作し、静止電流はわずか $50\mu A$ であるため、バッテリ駆動のシステムに理想的です。INA333 デバイスは自動キャリブレーション手法により、拡張産業用温度範囲全体にわたって非常に優れた精度を実現し、DC にまで及ぶ超低ノイズ密度 ($50nV/\sqrt{Hz}$) も達成しています。

2.3.2 TLV9002

TLV9002 は、レールツー レールの入力および出力スイング機能を備えた低電圧 ($1.8V \sim 5.5V$) オペアンプです。このオペアンプは、低電圧での動作と大きな容量性負荷の駆動が必要な煙探知器、ウェアラブル電子機器、小型家電などのスペースが限られたアプリケーションにコスト効率の高い方法を提供します。TLV900x ファミリの容量性負荷の駆動能力は $500pF$ であり、オープン ループ出力インピーダンスが抵抗性なので、はるかに大きな容量性負荷についても容易に安定化できます。これらのオペアンプは低電圧 ($1.8V \sim 5.5V$) で動作し、TLV600x- デバイスと同様の性能仕様を満たすよう、特別に設計されています。TLV9002 は、堅牢に設計されているため、回路設計を簡素化できます。これらのオペアンプは、ユニティゲイン安定性、RFI および EMI 除去フィルタ内蔵、およびオーバードライブ状態で位相反転がない、といった特長があります。

2.3.3 LM2664

LM2664 CMOS チャージポンプ電圧コンバータは、 $1.8V \sim 5.5V$ の範囲の正電圧を、 $-1.8V \sim -5.5V$ の関連する負電圧に変換します。このデバイスは 2 つの低コストコンデンサを使用して、最大 $40mA$ の出力電流を供給します。

LM2664 は、出力抵抗と電圧リップルを低減するために、 $160kHz$ 発振器周波数で動作します。LM2664 は、動作電流

がわずか $220\mu\text{A}$ (ほとんどの負荷で動作効率は 91% 以上) で、シャットダウン電流が標準で $1\mu\text{A}$ であるため、バッテリ動作システムに効果的性能なを提供します。

2.3.4 TLV2387

TLV2387 は、最新の性能を備えた高精度アンプです。TLV2387 は、ゼロドリフト テクノロジーにより、オフセット電圧およびオフセット ドリフトについて比類のない長期安定性を実現します。TLV2387 は、静止電流がわずか $570\mu\text{A}$ でありながら、 5.7MHz の帯域幅、 $8.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ の広帯域ノイズ、さらに 177nV_{pp} の $1/\text{f}$ ノイズ性能を実現しています。これらの仕様は、16 ビット～24 ビットの A/D コンバータ (ADC) で、非常に高い精度を実現するとともに、直線性の低下を避けるために重要なものです。TLV2387 は温度に対してバイアス電流がほぼ一定であるため、高入力インピーダンスのアプリケーションでは温度変動に対するキャリブレーションをほとんど、あるいは全く必要としません。

2.3.5 LOG300

LOG300 は、低ノイズアンプ (LNA) と対数検出器ブロックで構成された統合型アナログ フロント エンド (AFE) です。このデバイスは $50\text{Hz} \sim 40\text{MHz}$ の入力周波数範囲と 98dB (標準値) のダイナミックレンジに対応しています。LOG300 は、広いダイナミックレンジの電圧および信号測定が求められるアプリケーションに適しています。LOG300 の対数検出器ブロックは、シングルエンド入力と差動入力の両方をサポートしています。内蔵 LNA は入力ノイズが小さいため、最小 $7\mu\text{V}_\text{P}$ の信号を測定できます。Log_Out ピンに接続されたコンデンサを調整することで、過渡出力応答を調整できます。LOG300 の内蔵周波数検出機能を使うと、入力信号の周波数とゼロクロス情報を抽出できます。

2.3.6 TL081H

TL081H デバイスは、業界標準の TL08x (TL081, TL082, TL084) デバイスの次世代バージョンです。このデバイスは、低オフセット (1mV 、代表値)、高スルーレート ($20\text{V}/\mu\text{s}$)、正電源への同相入力などの特長を備え、コスト重視のアプリケーション向けに最適です。高 ESD (1.5kV, HBM)、EMI および RF フィルタの内蔵、 $-40^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ の温度範囲での動作により、TL081H デバイスは最も過酷で要求の厳しいアプリケーションで使用できます。このデバイスは、シグナル コンディショニング回路に対して中間電圧基準点を生成することにより、単一電源動作を使用できます。

3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

3.1 ハードウェア要件

ロゴスキーコイルの性能とそれに関連するシグナル コンディショニング回路を正確に評価するには、以下のハードウェアが必要です。

1. オシロスコープ: シグナル コンディショニング回路からの出力波形を観測するために使用します。高帯域幅スコープにより、ロゴスキーコイルのゼロクロスでの高速過渡およびスパイク挙動を正確にキャプチャできます。
2. USB-C 電源入力 (5VDC): シグナル コンディショニング ボードに安定した電力を供給します。システムへのスイッチングノイズの注入を避けるため、電源はクリーンで絶縁されていることを確認します。
3. 電流注入機能付き電流源またはファンクションジェネレータ: ロゴスキーコイルを通じて既知の電流波形を駆動するには、プログラム可能な AC またはパルス電流源が必要です。
4. 高精度の電流測定ツール (電流クランプ計、キャリブレーション済みの電流プローブなど): 導体を流れる実際の電流を高精度で測定するには必須です。これにより、ロゴスキーコイルの出力と比較し、振幅、位相精度、直線性、および精度を検証できます。
5. 負荷 (抵抗性または実際): 現実の動作条件を作成し、電流源が既知のインピーダンスを介して電流を駆動できるようにするために使用されます。

3.2 テスト設定

3.2.1 メータリング設定

図 3-1 は、ANSI C12.1 に従ってクラス 0.2 ~ クラス 0.3 をターゲットとする収益グレード メーターを模倣するために必要な完全なシステム セットアップを示します。テストのセットアップは、以下の 4 つの主要部分で構成されています。

1. プログラマ可能な電流および電圧ソース (PTS3.3C テストシステム)
2. 複数の PCB ロゴスキーコイルを搭載したシグナル コンディショニング ボード (TIDA-010987)
3. ADS131M08 計測評価基板
4. メーターの性能監視とキャリブレーションのための GUI

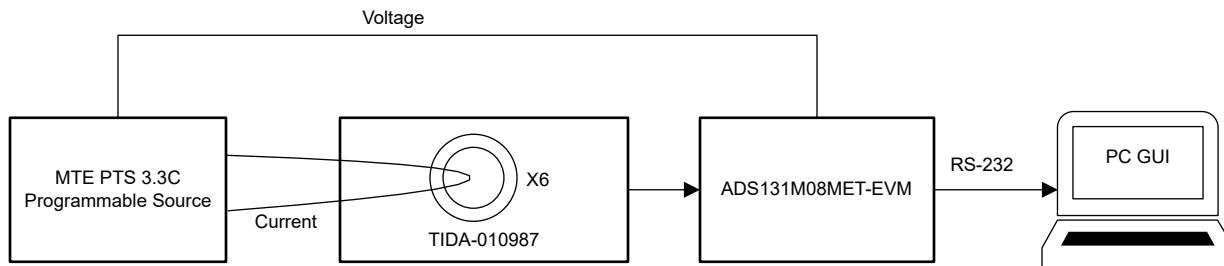


図 3-1. フル システム セットアップ

3.2.1.1 高精度電流源

図 3-2 に、MTE テスト装置を示します。測定には精度クラス 0.05% の MTE PTS3.3C が使用されるため、測定時の不確定性が最小限に抑えられます。



図 3-2. MTE 試験装置

3.2.1.2 TIDA-010987

図 3-3 に、使いやすさを考慮したパンチアウトおよびプラグイン フォーム ファクタで、6 つの異なるサイズのコイルとアナログ信号条件回路を備えたボードを示します。

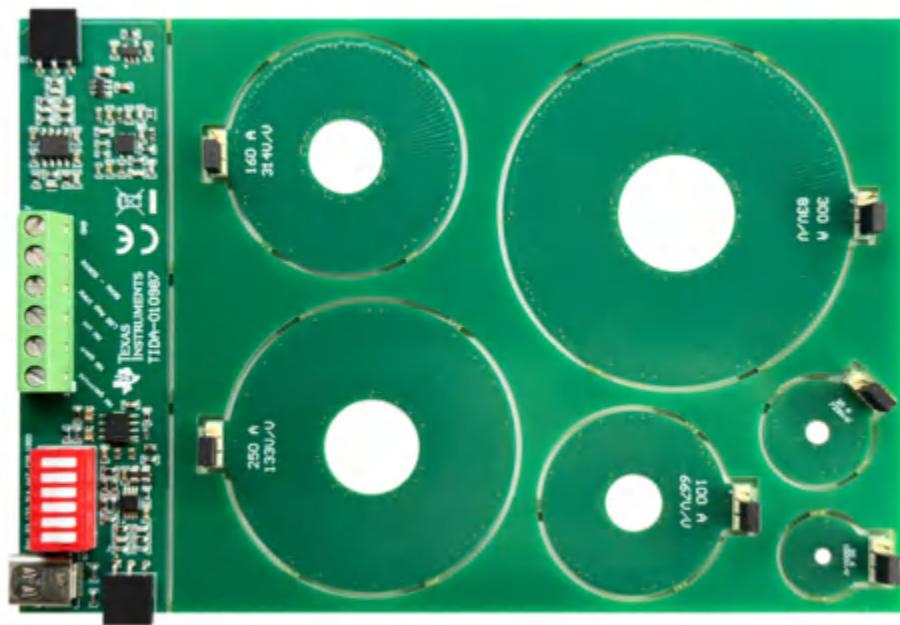


図 3-3. パンチアウトボード

3.2.1.3 ADS131M08 計測評価基板

図 3-4 に、エネルギー計算と消費電力測定に必要な ADC と MCU を搭載した EVM を示します。

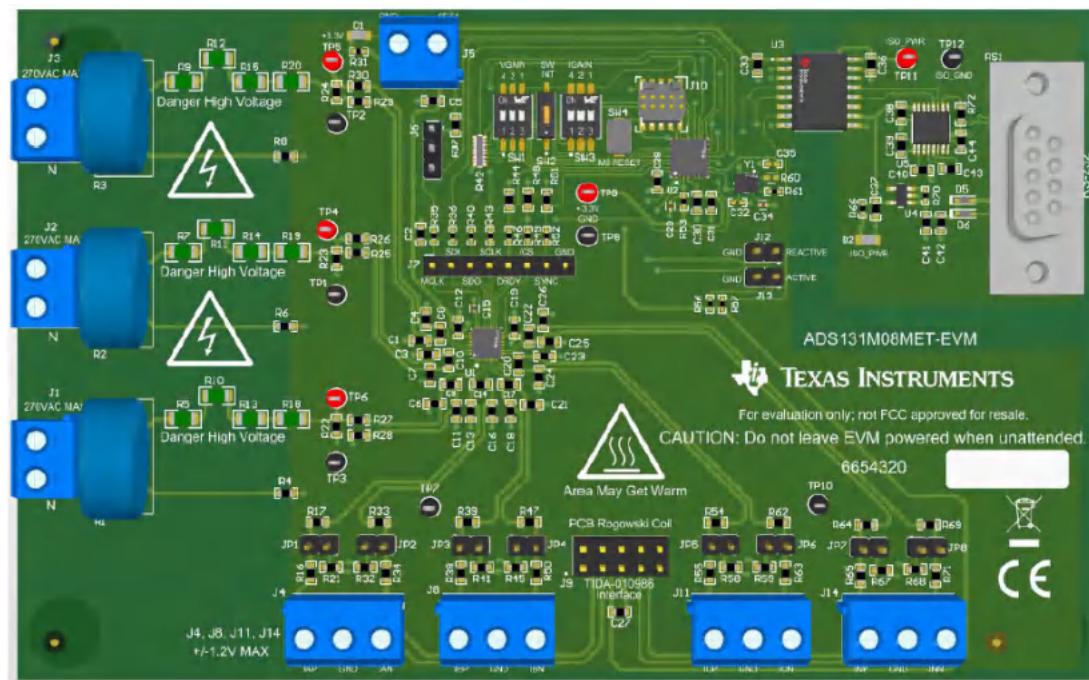


図 3-4. エネルギー計算と消費電力測定用の ADC と MCU を搭載した EVM

3.2.1.4 GUI

図 3-5 に、メーターの消費電力とメーター キャリブレーションの追跡に使用する PC GUI を示します。



図 3-5. メーターの消費量とメーターのキャリブレーションの追跡し

3.2.2 5kHz ~ 50kHz のバンドパスと対数アンプのテスト設定

3.2.2.1 オシロスコープ

以下のオシロスコープ機器はテスト用に推奨されており、リファレンス デザインには含まれていません。

- Tektronix MDO3050
- 2 個の Tektronix TPP0500B 500MHz プローブ

3.2.2.2 ファンクション ジェネレータ

以下のファンクション ジェネレータはテスト用に推奨されており、リファレンス デザインには含まれていません。

- Agilent 33210A 10MHz 関数、任意波形ジェネレータ

3.3 テスト結果

このセクションでは、PCB のロゴスキーコイルとシグナル コンディショニング基板 (TIDA-010987) で実行される各種テストについて説明します。テストは ANSI C12.1 および適用される IEC 規格に従って実施します。また、このセクションではテスト結果を示し、さまざまな使用事例およびコイルにおける精度、直線性、ノイズ耐性の観点でシステム性能を強調しています。目標は、設計が計量規格に準拠していること、および実際のアプリケーションの有用性を検証することです。

表 3-1. 感度ゲイン ガイド

コイル サイズ (外径 × 内径) mm	60Hz 時の感度 (μV/A)	必要ゲイン	RG
60 × 20	41.77	475	210
50 × 16	34.71	572	175
40 × 12	27.85	713	140
32 × 10	21.79	911	110
16 × 4	11.1	1000 (最大ゲイン)	100
13 × 3	9.1	1000 (最大ゲイン)	100

3.3.1 無負荷状態

3.3.1.1 目標

このテストでは、電流が回路に流れないとときに、システムがパルス (電流読み取り値) を登録しないことを検証します。

3.3.1.2 構成

回路内に電圧が存在し、電流を回路から切断する必要があります。

3.3.1.3 要件

無負荷状態については、以下の要件を遵守します:

- 最初の 10 分間:
 - 複数のテストパルスを発行しないでください
 - 1 つのテストパルスの等価値よりもエネルギーが蓄積しないようにしてください
- 次の 20 分間:
 - テストパルスをこれ以上発行しないでください
 - これ以上エネルギーを蓄積しないでください

3.3.1.4 結果

回路内に電圧が存在し、すべての電流回路が切断されています。テスト中 (20 分)、システムは 1 つのパルスを記録しました。

3.3.2 開始負荷テスト

3.3.2.1 目標

このテストは、最小定格電圧にわたってスタートアップ負荷条件において、メーターが継続的かつ確実に動作し、両方向でエネルギーを正しく測定していることを検証します。

3.3.2.2 構成

対象となる電流クラスに指定された開始負荷電流を印加します。このテストでは、計測アプリケーションの電流クラス 100 およびクラス 0.1 ~ クラス 0.2 の精度が目標です。

3.3.2.3 要件

初期負荷動作テストでは、以下の要件に従ってください。

- テスト全体の間、メーターは連続した動作を維持する必要があります。
- このテストは、両方のエネルギー方向に合格する必要があります。

3.3.2.4 結果

図 3-6 に開始負荷テストの結果を示します。

Meter 1	
Phase A	
RMS voltage	120.002V
Phase V->I	10.10°
Phase V->I (Reported)	10.07°
Fund voltage	120.009V
Voltage THD	2.26%
RMS current	0.114301A
Fund current	0.048217A
Current THD	0.00%
Active power	5.977W
Fund. active power	5.777W
Reactive power	1.061var
Fund. reactive power	0.397var
Apparent power	6.071VA
Fund. apparent power	2.574VA
Power factor	0.985L

図 3-6. 開始負荷テストの結果

3.3.3 有効電力の測定

3.3.3.1 目標

このテストでは、負荷条件が変化してもメーターがクラス 0.1 ~ クラス 0.2 の精度を維持し、許容可能な誤差制限内にとどまっていることを検証します。

3.3.3.2 構成

さまざまな負荷条件での精度テストでは、以下の構成を確認します：

- キャリブレーションは、公称電流、電圧、力率、周波数の値で行う必要があります。
- このテストのキャリブレーション条件は、それぞれ 15A、120V、1、60Hz です。
- 対象となる電流クラスに指定された負荷電流を印加します。

3.3.3.3 要件

精度は、リファレンス値からの許容偏差の範囲内に維持する必要があります。

3.3.3.4 結果

表 3-2 に、有効電力の測定結果を示します。

表 3-2. 有効電力の測定結果

CURRENT	(0 度)											
	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	ERROR 6	平均誤差 %	デルタ誤差	REF からの デルタ	制限 (%) [クラス 0.5]	制限 (%) [クラス 0.2]	制限 (%) [クラス 0.1]
1.0	-0.296	0.174	-0.013	-0.236	0.044	-0.280	-0.1012	0.4700	-0.0955	1.000	0.400	0.200
1.5	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.0062	0.2350	0.0118	0.500	0.200	0.100
3.0	0.028	-0.086	-0.151	0.102	0.167	0.029	0.0148	0.3180	0.0205	0.500	0.200	0.100
10.0	-0.040	-0.035	-0.082	-0.032	0.034	-0.090	-0.0408	0.1240	-0.0352	0.500	0.200	0.100
15.0	-0.028	-0.048	-0.045	0.073	0.023	-0.009	-0.0057	0.1210	(REF)	0.200	0.100	0.050
30.0	0.025	0.017	0.034	0.008	0.000	-0.013	0.0118	0.0470	-0.0175	0.500	0.200	0.100
50.0	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.0235	0.0300	-0.0292	0.500	0.200	0.100
75.0	0.022	0.035	0.031	0.026	0.037	0.014	0.0275	0.0230	-0.0332	0.500	0.200	0.100
90.0	0.041	0.036	0.056	0.054	0.051	0.039	0.0462	0.0200	-0.0518	0.500	0.200	0.100
100.0	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.0667	0.0150	-0.0723	0.500	0.200	0.100

3.3.4 力率の変動

3.3.4.1 目標

このテストでは、一つの力率だけでなくさまざまな力率でも、メーターが継続的かつ確実、正確に動作することを検証します。

3.3.4.2 構成

進み力率(容量性)と遅れ力率(誘導性)の、両方の異なる力率を適用します。

3.3.4.3 要件

力率の変動による誤差が、電流クラスおよび対象となる精度クラスで規定された制限を超えてはいけません。

3.3.4.4 結果

表 3-3 および 表 3-4 にさまざまな条件での力率結果の変動を示します。

表 3-3. 60 度での力率結果の変動

電流	(60 度) リード										
	誤差 1	誤差 2	誤差 3	誤差 4	誤差 5	誤差 6	平均誤差 %	デルタ誤差	REF からのデルタ	制限 (%) [クラス 0.5]	制限 (%) [クラス 0.2]
1.500	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.006	0.235	(REF)	該当なし	該当なし
3.000	-0.180	0.099	0.082	-0.110	0.102	0.055	0.008	0.282	-0.002	1.000	0.500
15.000	-0.028	-0.048	-0.045	0.073	0.023	-0.009	-0.006	0.121	(REF)	該当なし	該当なし
15.000	-0.040	-0.181	0.018	0.036	0.080	-0.013	-0.017	0.261	0.011	0.600	0.300
50.000	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.024	0.030	(REF)	該当なし	該当なし
50.000	0.055	0.020	0.032	0.073	0.026	0.003	0.035	0.070	-0.011	0.600	0.300
100.000	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.067	0.015	(REF)	該当なし	該当なし
100.000	-0.042	-0.036	-0.062	-0.056	-0.051	-0.021	-0.045	0.083	0.111	0.600	0.300

表 3-4. 323.13 度での力率結果の変動

CURRENT	(323.13 度) 遅れ											
	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	ERROR 6	平均誤差 %	デルタ誤差	REF からのデルタ	制限 (%) [クラス 0.5]	制限 (%) [クラス 0.2]	制限 (%) [クラス 0.1]
1.500	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.006	0.235	(REF)	該当なし	該当なし	該当なし
3.000	0.086	0.012	-0.120	-0.092	-0.062	0.053	-0.021	0.206	0.027	1.000	0.500	0.250
15.000	-0.028	-0.048	-0.045	0.073	0.023	-0.009	-0.006	0.121	(REF)	該当なし	該当なし	該当なし
15.000	0.022	-0.038	-0.115	-0.086	-0.104	-0.001	-0.054	0.137	0.048	0.600	0.300	0.150
50.000	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.024	0.030	(REF)	該当なし	該当なし	該当なし
50.000	0.074	0.104	-0.012	0.027	-0.007	0.009	0.033	0.116	-0.009	0.600	0.300	0.150
100.000	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.067	0.015	(REF)	該当なし	該当なし	該当なし
100.000	0.093	0.104	0.106	0.100	0.109	0.118	0.105	0.025	-0.038	0.600	0.300	0.150

3.3.5 電圧テストの変動

3.3.5.1 目標

このテストでは、公称電圧を超える電圧範囲にわたって、メーターが継続的かつ確実、正確に動作することを検証します。

3.3.5.2 構成

メーターの指定電圧範囲に応じて異なる電圧を印加します。テストポイントの条件は以下のとおりです。

- システムの最小定格電圧の 90% に達します
- 公称電圧
- ランダムな中間点
- 最大定格電圧
- 最大定格電圧の 110%

3.3.5.3 要件

電圧変動による誤差が、対象となる電流クラスおよび精度クラスで規定された制限を超えてはいけません。

3.3.5.4 結果

表 3-5 は電圧の変動結果を示しています。

表 3-5. 電圧テストの結果の変動

電圧	$\cos \phi = 1i$ (0 度)							ANSI C12.1 2022		
	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	デルタ誤差	平均誤差 %	REF からの デルタ	制限 (%) [クラス 0.1]	制限 (%) [クラス 0.2]
	テスト電流 (TA)								1.5	1.5
120 (REF)	0.023	0.068	0.018	0.129	0.113	0.111	0.070	(REF)	REF	REF
108	0.114	0.177	0.09	0.046	-0.113	0.290	0.0628	0.007	± 0.1	± 0.2
235	-0.076	-0.022	-0.019	-0.053	0.109	0.185	-0.0122	0.082	± 0.1	± 0.2
270	0.046	0.006	-0.073	-0.039	0.012	0.119	-0.0096	0.080	± 0.1	± 0.2
297	0.006	0.029	-0.005	-0.068	-0.062	0.097	-0.0200	0.090	± 0.1	± 0.2
テスト電流 (TA)										
	15	15	15	15	15					
120 (REF)	-0.077	-0.073	-0.065	-0.117	-0.077	0.052	-0.0818	(REF)	REF	REF
108	-0.071	-0.1	-0.077	-0.119	-0.086	0.048	-0.0906	0.009	± 0.1	± 0.2
235	-0.019	0.094	0.032	0.09	0.009	0.113	0.0412	0.123	± 0.1	± 0.2
270	0.02	-0.003	-0.05	0.036	0.012	0.086	0.0030	0.085	± 0.1	± 0.2
297	-0.05	-0.081	-0.081	-0.097	-0.057	0.047	-0.0732	0.009	± 0.1	± 0.2

3.3.6 周波数の変動

3.3.6.1 目標

このテストでは、公称周波数を超える周波数範囲にわたって、メーターが継続的かつ確実、正確に動作することを検証します。

3.3.6.2 構成

メーターの指定された周波数範囲に応じて異なる周波数を適用します。テスト ポイントの条件は以下のとおりです。

- 条件 1: 基準周波数の 98%
- 条件 2: 基準周波数の 102%
- 条件 3: 高電流時にリファレンス周波数の 98%
- 条件 4: 高電流時にリファレンス周波数の 102%

3.3.6.3 要件

周波数変動による誤差が、対象となる電流クラスおよび精度クラスで規定された制限を超えてはいけません。

3.3.6.4 結果

は周波数の結果の変動を表 3-6 示しています。

表 3-6. 周波数結果の変動

FREQUENCY	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	デルタ誤差	平均誤差 %	REF からの デルタ	制限 (%) [クラス 0.1]	制限 (%) [クラス 0.2]					
	テスト電流 (TA)														
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5										
50 (REF)	0.067	0.18	0.112	0.164	-0.066	0.246	0.0914	(REF)	REF	REF					
49	0.193	-0.126	0.059	0.176	0.23	0.356	0.1064	0.015	±0.05	±0.1					
51	0.152	0.224	0.187	0.177	-0.195	0.419	0.1090	0.018	±0.05	±0.1					
60 (REF)	-0.048	0.140	-0.069	-0.139	-0.080	0.279	-0.0392	(REF)	REF	REF					
58.8	-0.08	-0.073	0.099	0.042	-0.025	0.179	-0.0074	0.032	±0.05	±0.1					
61.2	0.13	-0.107	0.11	-0.296	0.076	0.426	-0.0174	0.022	±0.05	±0.1					
テスト電流 (TA)															
	15	15	15	15	15										
50 (REF)	0.008	-0.028	-0.036	-0.006	-0.014	0.044	-0.0152	(REF)	REF	REF					
49	0.007	0.016	0.000	0.000	-0.012	0.028	0.0022	0.017	±0.05	±0.1					
51	-0.008	-0.033	0.010	0.008	0.000	0.043	-0.0046	0.011	±0.05	±0.1					
60 (REF)	0.069	0.073	0.097	0.085	0.050	0.047	0.0748	(REF)	REF	REF					
58.8	0.079	0.090	0.095	0.094	0.094	0.016	0.0904	0.016	±0.05	±0.1					
61.2	0.097	0.079	0.086	0.013	-0.002	0.099	0.0546	0.020	±0.05	±0.1					

3.3.7 バンドパス

3.3.7.1 目標

このテストでは、AFE の周波数応答を検証します。

3.3.7.2 構成

ファンクション ジェネレータをロゴスキーコイルの代わりに AFE 入力に接続します。グランドを基準とする 5kHz ~ 50kHz のマークされた出力テスト ポイントでオシロスコープを使用して、50Hz ~ 400kHz の周波数応答を測定します。パッシブプローブは AC 結合しており、スケーリングとピークツー ピークの測定が可能です。

このシステムは、入力電圧と出力電圧を測定します。周波数に対して線形にスケーリングする実効ロゴスキーコイルに基づいて正規化係数が適用されます。図 3-7 の組み合わせプロットは、AFE 応答測定値を示しています。

3.3.7.3 要件

バンド パス要件には、5kHz と 50kHz に対応する -3db カットオフ周波数が含まれます。

3.3.7.4 結果

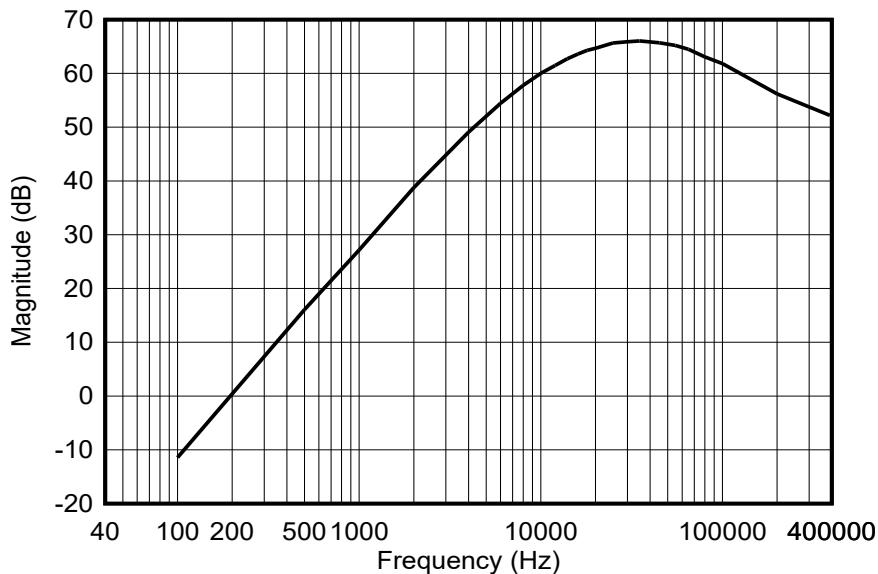
表 3-7 および 図 3-7 に、TLV387 バンド パス フィルタの周波数応答データとグラフを示します。

表 3-7. バンド パスの結果

FREQUENCY	入力電圧	出力振幅 (V)	正規化係数	V/V	dB
100	3.76	0.504	2	0.268085	-11.4345
500	2.8	1.78	10	6.357143	16.06524
1000	0.72	0.82	20	22.77778	27.15023
2000	0.72	1.56	40	86.66667	38.75704
4000	0.72	2.56	80	284.4444	49.07995
6000	0.72	3.16	120	526.6667	54.43072
8000	0.72	3.48	160	773.3333	57.76733
10,000	0.72	3.6	200	1000	60
12000	0.72	3.56	240	1186.667	61.48657
14000	0.72	3.52	280	1368.889	62.72736

表 3-7. バンド パスの結果 (続き)

FREQUENCY	入力電圧	出力振幅 (V)	正規化係数	V/V	dB
16000	0.72	3.4	320	1511.111	63.58593
18000	0.72	3.28	360	1640	64.29688
20000	0.72	3.08	400	1711.111	64.66556
25000	0.72	2.76	500	1916.667	65.65093
30000	0.72	2.36	600	1966.667	65.87462
35000	0.72	2.06	700	2002.778	66.03266
45000	0.72	1.54	900	1925	65.68861
55000	0.72	1.19	1100	1818.056	65.19214
65000	0.72	0.928	1300	1675.556	64.48318
80000	0.72	0.64	1600	1422.222	63.05935
100000	0.72	0.444	2000	1233.333	61.82161
200000	0.72	0.116	4000	644.4444	56.18371
400000	0.72	0.036	8000	400	52.0412


図 3-7. TLV387 バンド パス フィルタの周波数応答

3.3.8 ログアンプ

3.3.8.1 目標

このテストでは、LOG300 AFE の応答と振幅を検証します。

3.3.8.2 構成

ファンクション ジェネレータをロゴスキーコイルの代わりに AFE 入力に接続します。出力のテスト ポイントとしてマークされた対数アンプで、オシロスコープを使用します。対数アンプの出力の大きさをボルトで測定します。ピーク感度は、低ノイズアンプの出力ピンと対数検出器の入力ピンとの間の LC ペアに基づいて 1MHz で発生します。

3.3.8.3 要件

以下は、対数アンプの要件のリストです。

- 出力は対数的にスケーリングされます
- ピーク感度は 1MHz で発生します

3.3.8.4 結果

図 3-8 に、LOG300 の出力振幅のグラフを示します。

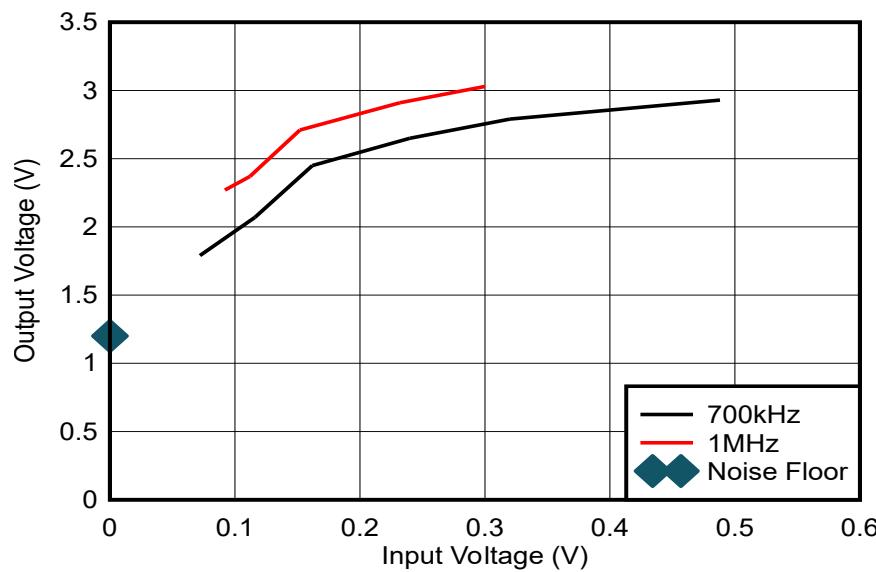


図 3-8. LOG300 の出力振幅

4 設計とドキュメントのサポート

4.1 デザインファイル

デザイン ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010987](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010987](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010987](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

4.1.3.1 レイアウトプリント

レイヤ プロットをダウンロードするには、[TIDA-010987](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.2 ツール

PSPICE-FOR-TI

TI Design / シミュレーション ツール向け PSpice®:

TINA-TI™ ソフトウェア

SPICE ベースのアナログ シミュレーション プログラム

4.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス インツルメンツ、「[INA333 マイクロパワー\(50µA\)、ゼロドリフト、レール ツー レール出力計測アンプ データシート](#)」
2. テキサス インツルメンツ、「[INA818 35µV オフセット、8nV/ \$\sqrt{Hz}\$ ノイズ、低消費電力、高精度計測アンプ データシート](#)」
3. テキサス インツルメンツ、「[INA828 50µV オフセット、7nV/ \$\sqrt{Hz}\$ ノイズ、低消費電力、高精度計測アンプ データシート](#)」
4. テキサス インツルメンツ、「[TLV900x 低電力、RRIO、1MHz オペアンプ、コスト重視システム向けデータシート](#)」
5. テキサス インツルメンツ、「[TLVx387 高精度、ゼロドリフト、低入力バイアス電流オペアンプ データシート](#)」
6. テキサス インツルメンツ、「[TL08xx FET 入力オペアンプ データシート](#)」
7. テキサス インツルメンツ、「[LM2664 スイッチトコンデンサ電圧コンバータ データシート](#)」
8. テキサス・インツルメンツ、[ADS131M08 計測評価モジュール ユーザーガイド](#)
9. テキサス インツルメンツ、「[TIDA-010986 ロゴスキーコイル向けシグナル コンディショニングのリファレンス デザインガイド](#)」

4.4 サポートリソース

4.5 商標

テキサス・インツルメンツの™ and TINA-TI™ are trademarks of Texas Instruments.

Python® is a registered trademark of Python Software Foundation.

PSpice® is a registered trademark of Cadence Design Systems, Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

5 著者について

Daniel Maaya は、テキサス インスツルメンツのダラスのシステム エンジニアで、電力計測やグリッド インフラストラクチャ のアプリケーション向けの高精度アナログ フロントエンドの設計の開発を担当しています。Daniel は、シグナル コンディショニング、計測 準拠 (ANSI/IEC)、パワー コンバータ、ロゴスキーコイル ベースのセンシング システムに関する深い専門知識を持ち、電気エレクトロニクスおよびパワー エレクトロニクス分野でこの職務に就いています。アナログ ハードウェア設計とシステム レベル統合の両方に直接携わった経験があり、EMC テストや高精度測定向けキャリブレーションも行なってきました。

NATHAN NOHR は、テキサス インスツルメンツのエネルギー インフラ チームのシステム エンジニアです。スマート サーキット ブレーカと故障検出を中心に業務を行っています。Nathan は、ミシガン大学で組込みシステムを中心に電気およびコンピュータ工学の修士号を取得しています。彼は以前、TI の電源設計サービス チームに所属していました。クワッド インターリーブ PCB ロゴスキーコイル、TI のフラックスゲート AC および DC 残留電流センシングトポロジを含む新しい電流センシング技術の開発を行ったほか、エッジ AI アーク障害検出に関する特許出願中です。

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默示保証、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、明示的または默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、(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ます。

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月