

## Design Guide: TIDA-011026

## フィールドトランスミッタプラットフォーム: 3 線式 4mA ~ 20mA インターフェイスのリファレンス デザイン



## 説明

このリファレンス デザインは、3 線式の電圧および電流インターフェイス センサ向け 4 ~ 20mA インターフェイスの実装例を示しています。このデザインを使用して電流ループプロテクタ「TPS2661」と組み合わせるとXTR200を評価できます。XTR200 には、4 ~ 20mA、0 ~ 20mA、0 ~ 10V など標準的な産業用信号レベルを使用する電圧および電流フィールドトランスミッタ通信インターフェイス用の出力駆動回路が内蔵されています。このリファレンスデザインでは、出力段を駆動する PWM インターフェイスに、ピン ヘッダ経由でアクセスできます。このピン ヘッダは、接続されたマイコン用の 3.3V 電源も提供します。

## リソース

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| TIDA-011026                 | デザイン フォルダ  |
| XTR200、TPS2661              | プロダクト フォルダ |
| TLV9302、OPA2991             | プロダクト フォルダ |
| TVS3301、ADS122S14           | プロダクト フォルダ |
| SN74LV8T165                 | プロダクト フォルダ |
| MSPM0-SDK、SNSR-DUAL-ADC-EVM | ツール フォルダ   |

## 特長

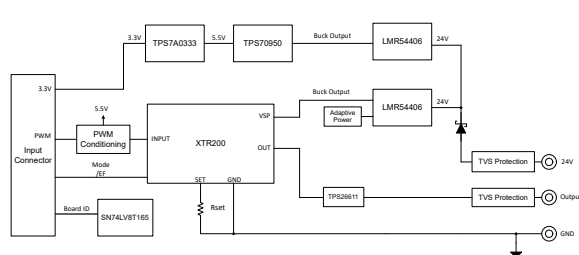
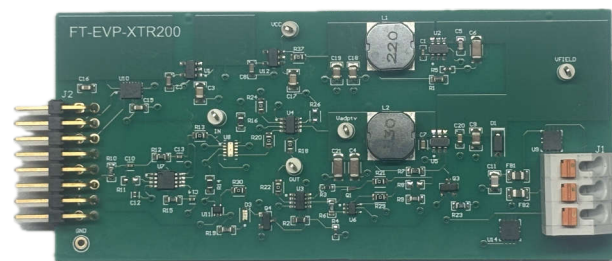
- 3 線式センサ用の 4 ~ 20mA ループ インターフェイスの実装
- マイコン PWM を介して出力段を駆動するローパス フィルタ回路
- 電流ループ保護機能と配線ミス保護機能を内蔵
- 電力効率を最大化する適応型電源回路
- 電源出力 (3.3V) および SPI を提供するマイコン インターフェイス

## アプリケーション

- 流量トランスミッタ
- レベルトランスミッタ
- 圧力トランスミッタ
- 温度トランスミッタ
- アナログ出力モジュール



テキサス・インスツルメンツの E2E™ サポート エキスパートにお問い合わせください。



## 1 システムの説明

このリファレンス デザインは、3 線式の電圧出力および電流出力に対応した産業用インターフェイスを実現しています。このデザインは、入力段に PWM フィルタを、XTR200 内に統合型出力段を組み込んでいます。このシステムは、出力範囲が 0 ~ 20mA、4 ~ 20mA、0 ~ 10V に設定されているため、電圧出力モードと電流出力モードを切り替えることができます。

フィールド電源は 2 個の降圧コンバータによってレギュレーションされます。1 つは出力段に電力を供給し、もう 1 つはローカル低ドロップアウト (LDO) レギュレータに低い電圧を供給します。出力段に電力を供給する降圧コンバータには、適応型電源回路が実装されています。この回路は、モジュールの出力電圧が上昇すると、XTR200 の電源電圧を上昇させます。この回路により、XTR200 の要件に応じて出力負荷を駆動するのに十分なヘッドルームが確保されます。もう 1 つの降圧コンバータ出力は、2 つの LDO を直列接続して提供され、5V および 3.3V に安定化されます。5V 電源信号は、PWM フィルタにローカルに使用されます。3.3V 電源信号は、MCU を搭載したセンサ モジュールにピン ヘッド経由で電力を供給するために使用されます。低い  $I_Q$  の LDO (TPS7A0333 および TPS70950) を使用することで、安定かつ高効率な電源出力を維持し、システムで利用可能な電力を最大限に確保しています。

PWM フィルタは 4 次アクティブ ローパス フィルタ (LPF) で、PWM 信号をアナログ入力信号に変換して XTR200 を駆動するためのものです。これにより、専用の D/A コンバータ (DAC) やマイコン内蔵 DAC を実装することなく、本リファレンス デザインを評価できます。

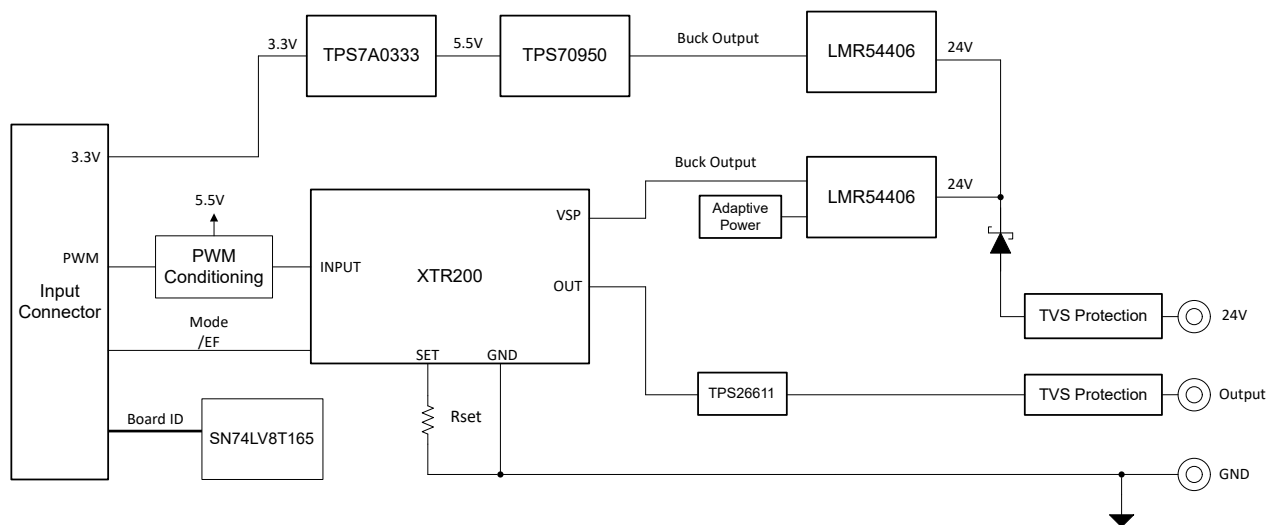
### 1.1 主なシステム仕様

表 1-1. 仕様

| パラメータ                 | 仕様             |
|-----------------------|----------------|
| フィールド電源電圧             | 8V ~ 36V       |
| 出力電流範囲                | 0mA ~ 27mA     |
| 出力電圧範囲                | 0~12.375V      |
| 分解能                   | 8.057uA、3.02mV |
| 電流出力モード RMS ノイズ       | 385nA          |
| 電流出力モードのピーク ツー ピークノイズ | 2.3uA          |
| 電圧出力モード RMS ノイズ       | 129uV          |
| 電圧出力モードのピーク ツー ピークノイズ | 775uV          |
| セトリング タイム             | 202us          |
| 電源出力                  | 3.3V           |
| 電源出力電流                | 2mA            |
| MCU へのインターフェイス        | SPI            |

## 2 システム概要

## 2.1 ブロック図



**図 2-1. TIDA-011026 のブロック図**

## 2.2 設計上の考慮事項

このリファレンス デザインは、フィールドトランスミッタおよびセンサ向けに、0mA ~ 20mA、4mA ~ 20mA、0V ~ 10V の出力段を実装しています。XTR200 には、出力モード (電圧または電流) に応じた信号チェーン ゲインと、低リーク PMOS 出力トランジスタを備えた出力段駆動回路が内蔵されています。

このモジュールは、センサ モジュールの **SNSR-DUAL-ADC-EVM** に接続するよう設計されています。このセンサ モジュールには、このボードを介してフィールド電源接続から電力を供給できます。また、このセンサ モジュールには、このデザインの回路を識別して駆動するための単一のファームウェア (FW) 設計も採用されています。

XTR200 への入力、PWM 信号を出力するセンサ ボードの MCU によって駆動されます。4 次のアクティブ LPF が PWM 信号を変調し、この信号を XTR200 入力に供給します。LPF はカットオフ周波数が 1.95kHz で、PWM 信号は 19.5kHz の周波数で動作するように設計されています。LPF アーキテクチャにより、フィルタからのクリーンな出力信号が得られるため、XTR200 へのクリーンな入力が可能になり、専用の DAC が不要になります。または、デバッグのためにテストポイント TP4 に接続された DAC または信号ジェネレータを使用して XTR200 入力を駆動すれば、LPF をバイパスすることもできます。

TPS2661 は、保護機能の観点から出力の過電流、過電圧、逆極性保護を備えています。電源とグランドの逆極性保護は、順方向バイアス ダイオード (D1) によって実現しています。TVS3301 TVS ダイオードが過渡電圧保護を提供し、電源ラインおよび出力ラインでの過渡事象による過剰な電圧レベルから保護します。電源ラインと出力ラインにフェライトビーズを接続すると、高周波ノイズが低減します。

出力段に電力を供給する降圧コンバータには、適応型電源回路が含まれています。適応型電源回路は、モジュールの出力電圧が上昇するにつれて、降圧コンバータのフィードバックピンから電流を引き込む電流シンクとして機能します。この回路の目的は、電源電圧を必要な最小限のヘッドルームに維持することで、**XTR200** の電力効率を最大化し、放熱を低減することです。高い負荷が存在する電流出力モードでは、この回路が特に重要な役割を担います。ヘッドルーム要件は、**XTR200** のデータシートに記載された仕様に従います。適応型電源回路は、**XTR200** のヘッドルームが常に出力電圧を少なくとも **3V** 上回るように設計されています。

## 2.3 主な使用製品

### 2.3.1 TPS7A03

TPS7A03 は、非常に優れた過渡性能で 200mA を供給できる超小型超低静止電流の低ドロップアウトレギュレータ (LDO) です。

TPS7A03 は、 $I_Q$  がわずか 200nA と非常に低く、静止電流の低さが重要となる用途に特化して設計されています。このデバイスはドロップアウトモードでも小さな  $I_Q$  消費を維持するため、バッテリー動作時間をさらに延長できます。シャットダウンまたはディセーブルモードでは、わずか 3nA の  $I_Q$  しか消費しないため、バッテリーの保存寿命を延ばすのに役立ちます。

TPS7A03 は 0.8V ~ 5.0V の出力範囲を持ち、50mV 刻みで設定可能なため、近年のマイコン (MCU) の低いコア電圧に対応できます。

TPS7A03 は、スマートイネーブル回路を備え、内部で制御されるプルダウン抵抗により、EN ピンをフローティング状態のままにしても LDO をディセーブル状態に維持します。これにより、EN ピンのプルダウンに使用する外付け部品を最小限に抑えることができます。この回路は、デバイスが有効になっている時に外付けのプルダウン回路を通じて流れる電流を最小限に抑える助けにもなります。

### 2.3.2 TPS709

TPS709 シリーズのリニアレギュレータは、消費電力が重要なアプリケーション用に設計された、静止電流が非常に低いデバイスです。高精度のバンドギャップおよびエラータンブにより、温度範囲全体にわたって 2% の精度が得られます。静止電流がわずか 1 $\mu$ A であるため、アイドル時の消費電力を最小限に抑える必要のある常時オンのバッテリー駆動システムに最適なソリューションです。これらのデバイスは、サーマルシャットダウン、電流制限、逆電流保護機能により安全性が強化されています。

シャットダウンモードは、EN ピンを Low にすることでイネーブルになります。このモードでのシャットダウン電流は、150nA (標準値) に低下します。

### 2.3.3 TVS3301

TVS3301 デバイスは、最大 27A の IEC 61000-4-5 フォルト電流をシャントし、大電力の過渡現象や落雷からシステムを保護します。このデバイスは、42 $\Omega$  のインピーダンスで結合した 1kV IEC 61000-4-5 開路電圧の一般的な産業用信号線 EMC 要件に適合しています。TVS3301 は帰還機構を使用して、フォルト中の正確なフラットクランプを提供し、システムがさらされる電圧を、従来型の TVS ダイオードよりも低く保ちます。厳格な電圧レギュレーションにより、設計者は電圧許容誤差の狭いシステム部品を安心して選択できるため、堅牢性を損なうことなくシステムのコストと複雑さを低減できます。TVS3301 は  $\pm 33V$  の範囲で動作するため、逆配線に対する保護を必要とするシステムでの動作も可能です。

さらに、TVS3301 はスペースの制約が厳しいアプリケーション用に設計された小型の SON フットプリントで供給されるため、標準の SMA および SMB パッケージと比較して大幅なサイズ低減が可能です。リーク電流と容量が小さいため、保護するラインへの影響も最小限です。製品のライフサイクル全体にわたり堅牢な保護を提供するため、テキサスインスツルメンツは TVS3301 をテストし、125°C で 5000 回の反復サージに対してデバイス性能に変化がないことを確認しています。

### 2.3.4 XTR200

XTR200 は、3 線式の電流または電圧システム用の高電圧、高精度出力ドライバで、0mA ~ 20mA、4mA ~ 20mA、0V ~ 10V などの標準的な産業用信号レベル向けに設計されています。MODE ピンでは、電流出力または電圧出力用にデバイスを設定でき、モードを切り替えるための外部部品を変更する必要はありません。電流出力モードでは、入力電圧と出力電流の比は、1 個の抵抗 RSET によって設定されます。電圧出力モードでは、XTR200 は 3.75V/V の固定ゲインを持っています。このゲインは、内蔵の高精度薄膜抵抗で設定します。

低リーク PMOS 出力トランジスタと短絡電流保護機能を内蔵しているため、必要な外付け部品がさらに少なくなっています。XTR200 と外付け PNP または PMOS トランジスタを使用することで、オンチップの消費電力を低減できます。オンチップ短絡保護機能は、損傷をもたらす過電流イベントから外部トランジスタを保護します。

XTR200 エラーフラグピン (EF) は、いくつかの温度または出力故障状態を示します。出力ディセーブルピン (OD) は、出力ピンを高インピーダンス状態にし、非常に低いリーク電流にします。

### 2.3.5 TPS2661

TPS2661x は、アナログ入力、アナログ出力、センサトランスミッタ、HART 入力、UART IO の保護に適したコンパクトで機能豊富な完全統合型電流ループ プロテクタです。このデバイスは、 $\pm 20\text{mA}$ 、 $0\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 、 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$  の汎用入力保護機能を搭載しています。7.5 $\Omega$  という低い RON 値により、電流ループの電圧降下を最小限に抑え、動作範囲を拡大することで、低い電圧の電源による動作にも対応できます。このデバイスは、 $\pm 50\text{V}$  までの正負の電源電圧に耐えられ、負荷を保護できます。MODE ピンを使用すると、デバイスの電流制限値を 2 倍に設定でき、2 線式トランスミッタの適切な起動が可能になります。このデバイスは、外部バイポーラ電源が最低  $\pm 2.25\text{V}$  から  $\pm 20\text{V}$  の範囲で動作します。このデバイスは、最小 3V  $\sim$  30V のユニポーラ電源でも動作可能です。TPS26610 および TPS26613 は、 $\pm V_s$  電源が供給されていない状態でもループ テストを行えるようにするため、ループ電源モードを備えています。

また、出力側のアナログ出力とセンサトランスミッタの誤配線があれば、電流経路を遮断してシステムを保護します。

TPS2661x は、堅牢な内部保護制御ブロックと 50V の定格電圧を備えており、信号ラインのサージ (IEC61000-4-5) と EFT (IEC61000-4-4) 過渡に対する保護に役立ちます。

### 2.3.6 OPAX991

OPAx991 ファミリー (OPA991、OPA2991、OPA4991) は、高電圧 (40V) の汎用オペアンプ ファミリーです。これらのデバイスは、レール ツー レール入出力、低いオフセット ( $\pm 125\mu\text{V}$ 、標準値)、低いオフセットドリフト ( $\pm 0.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、標準値)、低ノイズ (10.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、1.8 $\mu\text{VPP}$ )、4.5MHz の帯域幅など、非常に優れた DC 精度と AC 性能を備えています。

電源レールまでの差動および同相入力電圧範囲、大出力電流 ( $\pm 75\text{mA}$ )、高スルーレート (21V/ $\mu\text{s}$ )、高い容量性負荷駆動能力 (1nF)、シャットダウン機能などの独自の機能を備えた OPAx991 は、高電圧産業アプリケーション用の堅牢な高性能オペアンプです。

### 2.3.7 TLV930X

TLV930x ファミリー (TLV9301、TLV9302、TLV9304) は、コスト最適化された 40V オペアンプ ファミリーです。これらのデバイスは、レール ツー レール出力、低いオフセット ( $\pm 0.5\text{mV}$ 、標準値)、低いオフセットドリフト ( $\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、標準値)、1MHz の帯域幅など、優れた汎用 DC および AC 仕様を備えています。

広い差動入力電圧範囲、大出力電流 ( $\pm 60\text{mA}$ )、高スルーレート (3V/ $\mu\text{s}$ ) などの便利な特長から、TLV930x は高電圧でコストの制約が厳しいアプリケーションに適した堅牢なオペアンプです。

### 2.3.8 LMR544XX

LMR544xx は、最大 1A および 0.6A の負荷電流を駆動でき、VIN が広く使いやすい同期整流降圧コンバータです。このデバイスは、4V  $\sim$  36V の広い入力電圧範囲で動作し、レギュレートされていない電源からの電源調整を行うさまざまな産業用アプリケーションに適しています。LMR544xx は 1.1MHz のスイッチング周波数で動作するため、比較的小型のインダクタを使用でき、設計サイズの最適化が可能です。

このデバイスには、軽負荷時に高効率を実現する PFM バージョンと、一定の周波数を維持しながら、全負荷範囲にわたって出力電圧リップルが小さい FPWM バージョンがあります。ソフト スタートと補償回路を内蔵しており、最小限の外付け部品でデバイスを使用できます。

このデバイスには、サイクル単位の電流制限、ヒカップ モード短絡保護、過剰な電力消費時のサーマル シャットダウンなどの保護機能が組み込まれています。

### 2.3.9 SN74LV8T165

SN74LV8T165 デバイスは、並列またはシリアル入力、シリアル出力の 8 ビット シフトレジスタです。このデバイスには、ロード データとシフト データという 2 つの動作モードがあり、SH/LD 入力で制御されます。出力レベルは電源電圧 (VCC) を基準としており、1.8V、2.5V、3.3V、5V の CMOS レベルをサポートしています。

入力は、低電圧 CMOS 入力の昇圧変換 (例: 1.2V 入力から 1.8V 出力、または 1.8V 入力から 3.3V 出力) をサポートするため、低スレッショルド回路を使って設計されています。また、5V 許容の入力ピンにより、降圧変換 (例: 3.3V から 2.5V 出力) が可能です。

### 3 システム設計理論

このセクションでは、この設計の各ブロックに関する情報について説明します。図 3-1 に、これらのブロックの配置を示します。

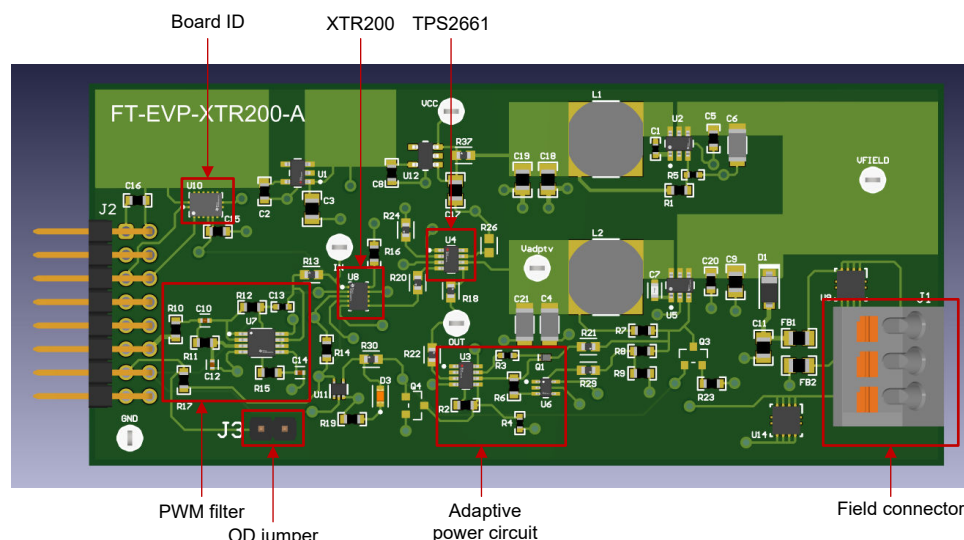


図 3-1. TIDA-011026 機能ブロック図

ソフトウェア内で基板を識別できるように、各基板にはシフトレジスタが搭載されており、入力ピンによって基板 ID 番号がコーディングされ、SPI 経由で MCU から読み取ることができます。

XTR200 は、この設計の主要部品です。このデバイスには、電圧と電流の両方の出力モードを駆動するために必要な回路が内蔵されています。出力モードはデバイスの **MODE** ピンで制御されます。このピンには、ヘッダ ピンを介してマイコンプラットフォームの **GPIO** からアクセスできます。また、XTR200 には電流駆動トランジスタと短絡保護機能も内蔵されています。

電源は、ショットキー ダイオードを使用して逆極性から、また TVS3301 TVS ダイオードを使用して過渡電圧から保護されています。フェライト ビーズを使用して高周波ノイズをフィルタリングできます。TPS2661 を使用して、出力を過電圧、過電流、逆極性から保護しています。

電源は、2 個の降圧コンバータでフィールド電源の電圧をレギュレーションします。そのうちの 1 つは XTR200 と TPS2661 に電力を供給します。この降圧コンバータは、適応型電源回路を採用しています。もう一方の降圧コンバータは、フィールド電源電圧を降圧し、基板上の 2 個の LDO に供給することで、クリーンな 5V および 3.3V の電源レールを生成します。これらの LDO は、PWM 回路にローカル電源 (5V) を供給するとともに、センサ ボードに電源 (3.3V) を供給します。

適応型電源回路は、バッファおよび降圧段用の TLV9302 とオフセットを提供する TLV9301 を使用して設計されており、基板の出力が 5V を超えた場合にのみ降圧コンバータの電源電圧出力が増加します。降圧段は、適応型電源回路が降圧コンバータのフィードバック ピンからちょうど十分な電流を引き込むことで、電源のグラウンドに対してモジュールの出力電圧より 3V 高い電圧に維持されるように設計されています。

PWM フィルタは、OPA2991 を使用した 4 次のアクティブ LPF です。OPA2991 はレール ツー レール出力に対応しているため、XTR200 の入力電圧を可能な限り 0V に近づけることができます。本設計では、OPA2991 は出力電圧を 10mV まで下げることができます。

## 4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、およびテスト結果

### 4.1 ハードウェア要件

図 4-1 に、適切な機能とデバッグのための TIDA-011026 テスト ポイント、ジャンパ、コネクタを示します。

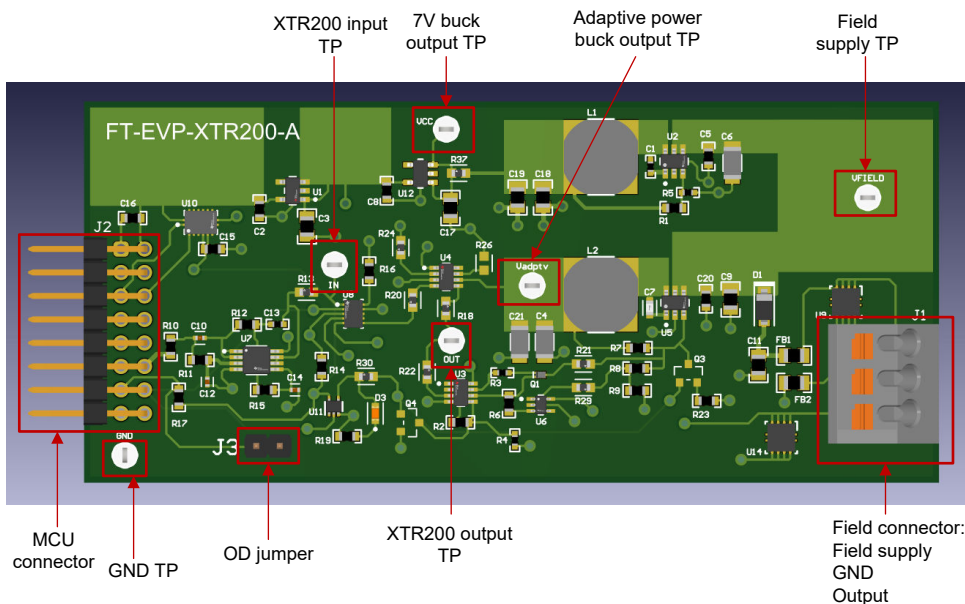


図 4-1. TIDA-011026 のテスト ポイント、ジャンパ、コネクタ

表 4-1. テスト ポイント、ジャンパ、おコネクタの説明

| 記号  | シルクスクリーン ID | ジャンパ、コネクタ         | 説明                                                                  |
|-----|-------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| J1  | J1          | フィールド コネクタ        | フィールド電源とフィールドトランスミッタ出力の接続。                                          |
| J2  | J2          | MCU コネクタ          | マイコン ボードへの接続。                                                       |
| J3  | J3          | OD ジャンパ           | このジャンパを短絡すると、XTR200 の出力が有効になります。これにより、センサ ボードなしでトランスミッタ ボードを評価できます。 |
| TP1 | GND         | GND テストポイント       | デバッグ用の GND テストポイントです。                                               |
| TP2 | OUT         | OUT テストポイント       | デバッグ用のフィールドトランスミッタ モジュール出力テストポイントです。                                |
| TP3 | VFIELD      | Vfield テストポイント    | デバッグ用のフィールド電源電圧テストポイントです。                                           |
| TP4 | IN          | XTR_IN テストポイント    | デバッグ用の XTR200 入力テストポイントです。これにより、センサ ボードなしでトランスミッタ ボードを評価および駆動できます。  |
| TP5 | VCC         | LDO_IN テストポイント    | デバッグ用の降圧出力テストポイントです。                                                |
| TP6 | Vadptv      | Vbuck_out テストポイント | デバッグ用の適応型電源の降圧出力です。                                                 |

コネクタ J1 はマイコン ボードに接続されます。表 4-2 にピン配置を示します。ピン 1 は PCB でマークされています。

**表 4-2. J1 コネクタのピン配置**

| ピン | 信号        |
|----|-----------|
| 1  | GND       |
| 2  | VDD-3V3   |
| 3  | 未使用       |
| 4  | 未使用       |
| 5  | ID0       |
| 6  | SCLK      |
| 7  | 未使用       |
| 8  | 未使用       |
| 9  | 未使用       |
| 10 | SDO       |
| 11 | 未使用       |
| 12 | PWM_Input |
| 13 | OD        |
| 14 | モード       |
| 15 | 未使用       |
| 16 | EF        |

## 4.2 テスト設定

すべてのテストにおいて、このリファレンス デザインは、MSPM0G1507 と 2 台の ADS122S14 ADC を搭載した SNSR-DUAL-ADC-EVM と組み合わせて使用されます。MSPM0G1507 は XTR200 を駆動し、ADC を制御します。

評価に使用されるソフトウェアは、MSPM0-SDK に含まれるサンプルの一部であり、次の場所からインポートできます：  
SDK\_INSTALL\_PATH\examples\nortos\LP\_MSPM0G3507\demos\field\_transmitter into Code Composer Studio

このソフトウェアは、シンプルでセンサ用の標準的なシグナル チェーンを実装しています。システムは ADC からデータを読み取り、値を線形化などで補正します。このソフトウェアは、4mA ～ 20mA 電流インターフェイスや 0V ～ 10V 電圧インターフェイスなどに合わせて値をスケーリングします。このプロセスには、インターフェイス固有のキャリブレーション値が含まれており、出力段を制御します。消費電力を低減するため、マイコンは低消費電力モードになり、定義されたクロックレートでのみウェイクアップしてシグナル チェーンを動作させます。図 4-2 に、ソフトウェアの流れ図とすべてのヘルパー関数を示します。

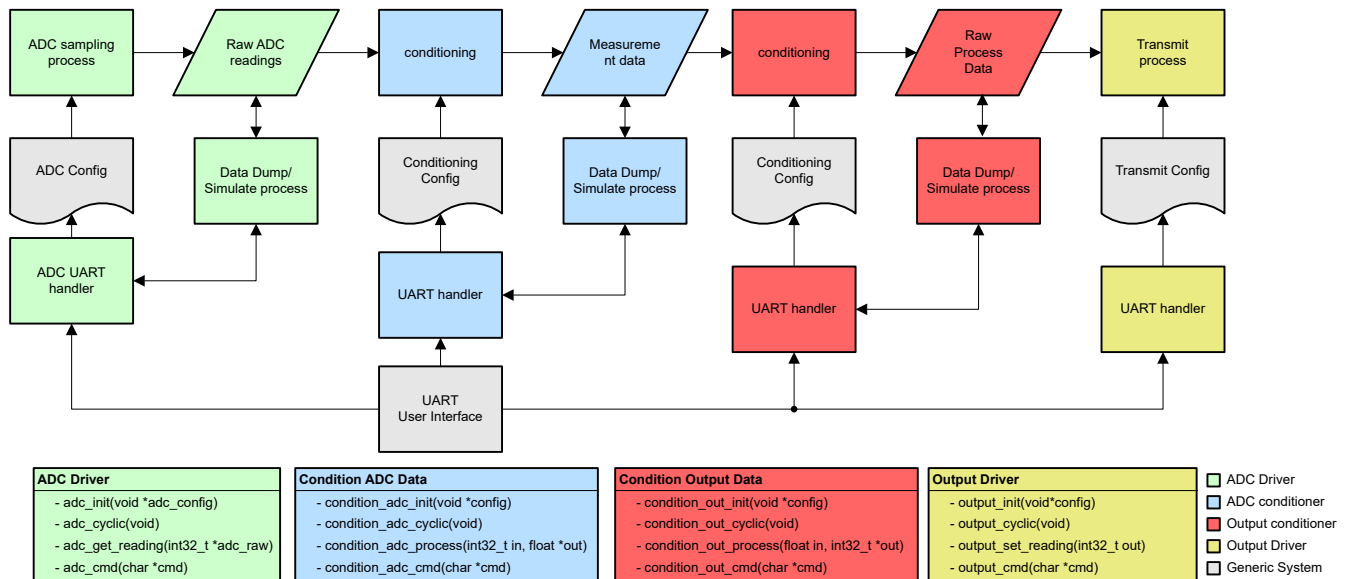


図 4-2. ソフトウェアの流れ図

このソフトウェアは、異なる ADC、インターフェイス、スケーリング関数に柔軟に対応できるように、関数ポインタを使用して主要なブロックを表現しています。ソフトウェアは起動時に、接続されたカードから読み取った ID に基づいて、これらのポインタに適切なドライバを割り当てます。関連する構造体は 2 つあります。1 つ目の構造体は、ADC 関数と入力スケーリング関数を持つアナログ入力側を定義します。2 つ目の構造体は出力側をカバーしており、CPU クロックを設定するための関数を指定する必要があります。

```
struct id_func_input_map_struct {
    /** adc initialisation function */
    adc_init_func adc_init;
    /** This function gets called regularly by the main function, do not block here */
    adc_cyclic_func adc_cyclic;
    /** read adc reading and return it */
    adc_get_reading_func adc_get_reading;
    /** handle uart commands and execute them */
    adc_cmd_func adc_cmd;

    /** adc conditioning init function */
    condition_adc_init_func condition_adc_init;
    /** adc conditioning cyclic function */
    condition_adc_cyclic_func condition_adc_cyclic;
    /** adc conditioning processing function */
    condition_adc_process_func condition_adc_process;
    /** adc conditioning uart cmd handler */
    condition_adc_cmd_func condition_adc_cmd;
};

struct id_func_output_map_struct {
    /** output conditioning init */
    output_init_func output_init;
    /** output conditioning cyclic function */
    output_cyclic_func output_cyclic;
    /** output conditioning set reading function */
    output_set_reading_func output_set_reading;
    /** output conditioning cmd handler */
    output_cmd_func output_cmd;
};
```

```

condition_out_init_func condition_out_init;
/** output conditioning cyclic function */
condition_out_cyclic_func condition_out_cyclic;
/** output conditioning set the output value */
condition_out_process_func condition_out_process;
/** output conditioning uart cmd handler */
condition_out_cmd_func condition_out_cmd;

/** output stage init */
output_init_func output_init;
/** output cyclic function */
output_cyclic_func output_cyclic;
/** output setter */
output_set_reading_func output_set_reading;
/** output uart handler */
output_cmd_func output_cmd;

/** init cpu clock */
cpu_clock_init_func cpu_clock_init;
};

```

表 4-3 に示す各ドライバには、共通した 4 つの関数を実装する必要があります。

**表 4-3. ドライバ関数**

| ドライバ名                                          | FUNCTION                                                             |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| init                                           | 構成済みメモリ、周辺機器、変数など、必要なすべてのコンポーネントを初期化します                              |
| cyclic                                         | メイン ループは、固定周期で毎サイクルこの関数を呼び出します。タイミングの生成や、周期的なポーリングを実行します。            |
| get_reading, process, set_reading, set_reading | 実際にデータを処理する関数です。ADC からデータを読み取り、スケーリングを実行して、出力値を DAC に設定します。          |
| cmd                                            | この関数は、コマンドライン インターフェイスを処理します。ユーザがこのドライバのコマンドを入力すると、システムはこの関数を呼び出します。 |

すべてのドライバには、他のドライバから使用できない独自の **static** 関数を実装できます。

このソフトウェアには、USB UART 経由のコマンドライン インターフェイスが備わっており、ADC やデータフローの制御ができます。すべてのコマンドは 2 段階のレベルで動作します。第 1 レベルでは、どのドライバがコマンドを受信するかを指定します。第 2 レベルには、特定のドライバに関連する実際のコマンドが含まれます。その他すべての処理は、ドライバの特定の関数により実行されます。すべてのレベルでヘルプ コマンドを利用できます (help、adc help)。

表 4-4 は、第 1 レベル コマンドの説明です。

**表 4-4. 第 1 レベル コマンド**

| 名称   | 説明                      | ファイル (正確なファイルは、ボード ID や構成により異なります) |
|------|-------------------------|------------------------------------|
| sys  | リセットやフラッシュなどのシステム関連コマンド | system/system.c                    |
| adc  | ADC ドライバ固有のコマンド         | adc/                               |
| out  | 出力固有のコマンド               | output/                            |
| cin  | ADC 入力コンディショニング固有のコマンド  | condition/                         |
| cout | 出力コンディショニング固有のコマンド      | condition/                         |

ADC サンプルを 1 つ取得するコマンド例として、**adc get** を使用すると、直前の ADC 読み取り値が UART に出力されます。ADC 読み取り値を連続的に取得するには、**adc stream** を使用してさらにテストを行います。

## 4.3 テスト結果

### 4.3.1 直線性テスト

このテストでは、リファレンス デザインをマイコンに接続して XTR200 を駆動し、アナログ出力を電源と電流出力モードまたは電圧出力モードの電流計または電圧計にそれぞれ接続します。システムはフィールド電源で駆動され、絶縁 UART を介して PC に接続されます。24V フィールド電源電圧で、これらすべてのテストを実施します。XTR200 は、3.3V のダイ



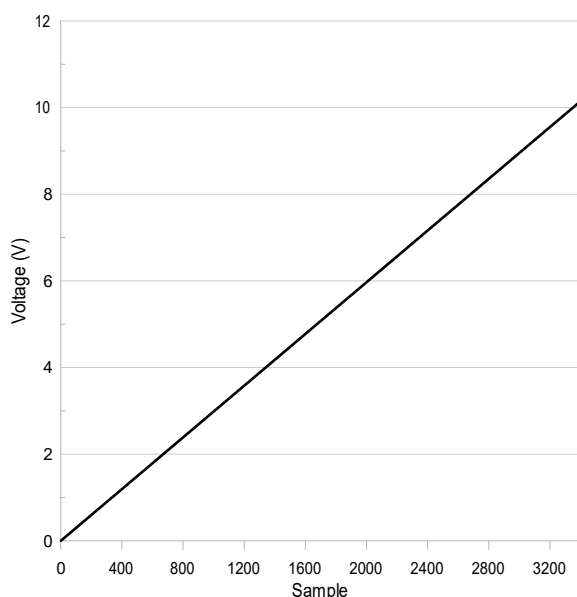


図 4-6. 電圧出力モード (V)

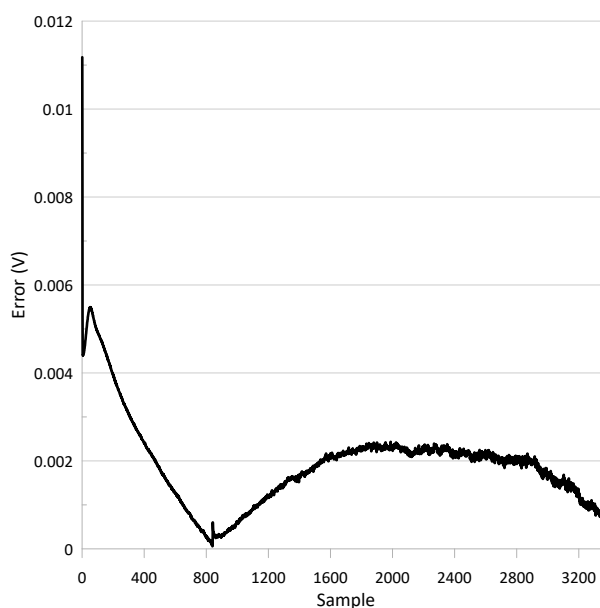


図 4-7. 電圧出力誤差

#### 4.3.1.1 直線性テストのまとめ

すべての構成において、結果はすべて仕様の範囲内に十分収まっており、どの構成にも不安定性やその他の非線形効果はみられません。

#### 4.3.2 ノイズ テストと電流ヒストグラム

このテストでは、テスト設定は[セクション 4.3.1](#)と同様です。ノイズ性能を評価するため、XTR200 の出力電流または出力電圧を 3 つの設定値 (最小値のゼロ、中間値、最大値) に設定し、そのときの電流または電圧を 10,000 回測定します。

[図 4-8](#) に包括的な設定を示します。

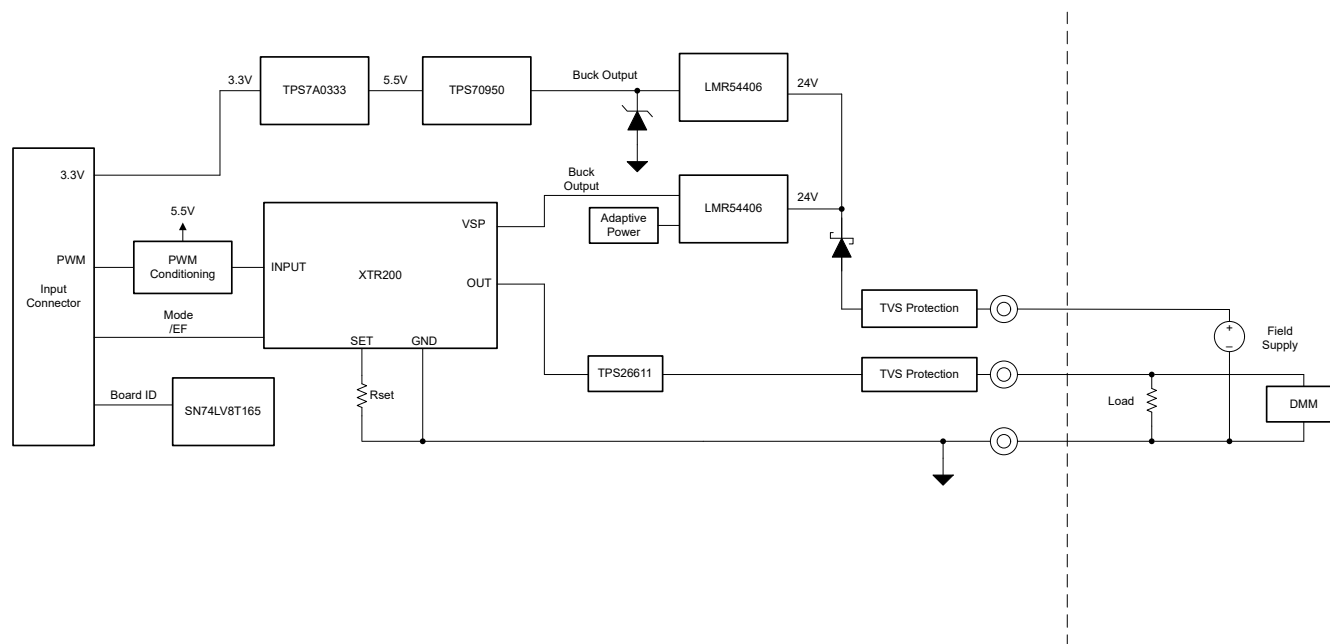


図 4-8. ノイズ テストのテスト設定

図 4-9 から 図 4-14 に、測定された電流のヒストグラムを示します。

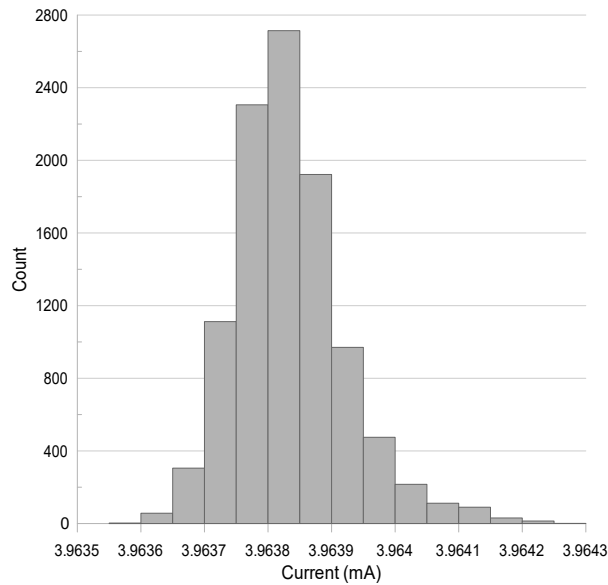


図 4-9. ヒストグラム電流出力モード、最小設定

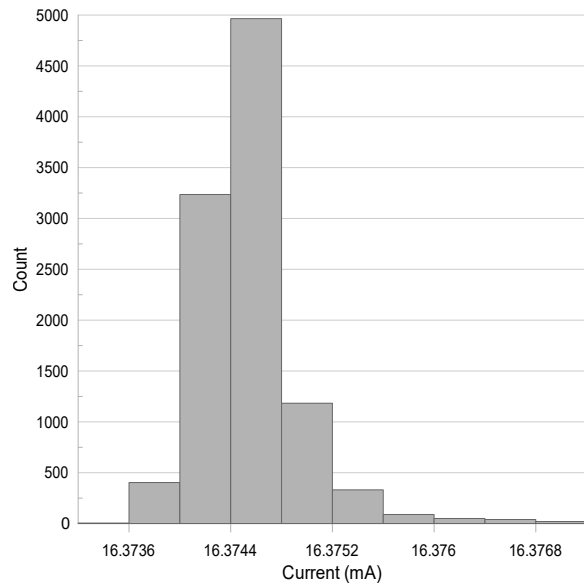


図 4-10. ヒストグラム電流出力モード、中間設定

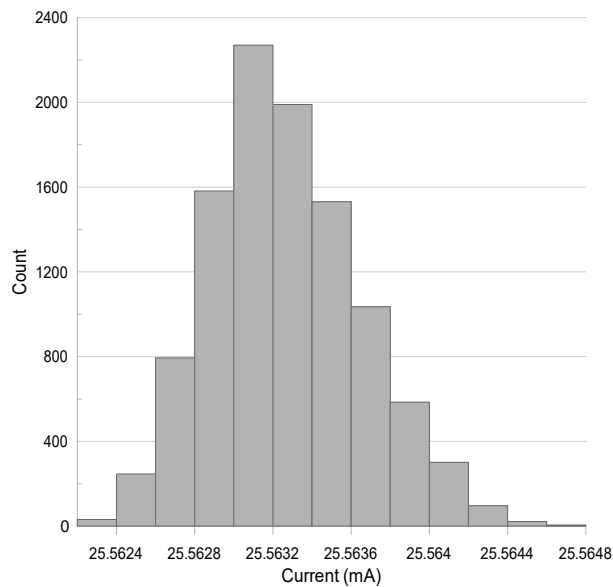


図 4-11. ヒストグラム電流出力モード、最大設定

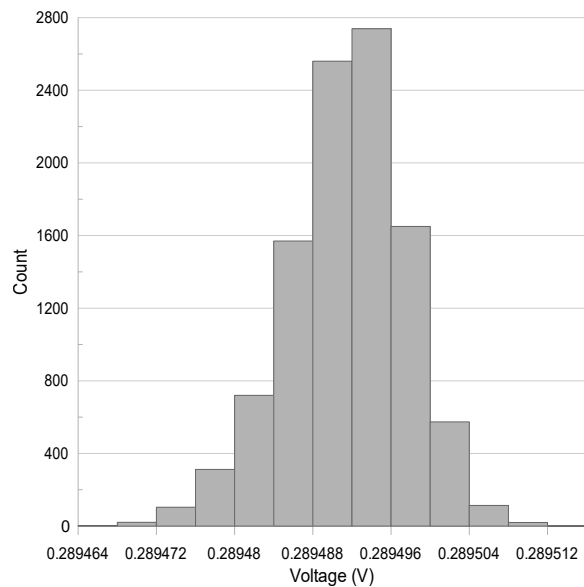


図 4-12. ヒストグラム電圧出力モード、最小設定

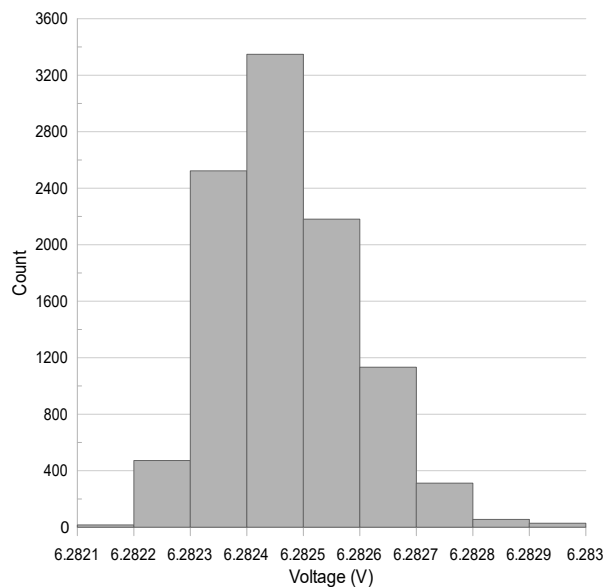


図 4-13. ヒストグラム電圧出力モード、中間設定

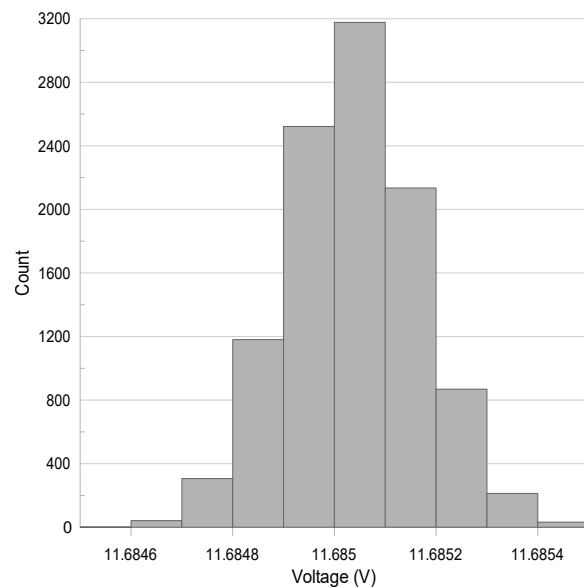


図 4-14. ヒストグラム電圧出力モード、最大設定

#### 4.3.2.1 ノイズ テストと電流ヒストグラムのまとめ

表 4-5 に、図 4-9 の未加工データの計算結果を示します。

表 4-5. ノイズのまとめ

| 出力モード | PWM<br>設定 | 最小出力      | 平均的<br>出力 | 最大<br>出力  | ピークツーピークノ<br>イズ | RMS ノイズ |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------|
| 電流    | 0         | 3.9636mA  | 3.9638mA  | 3.9643mA  | 0.522μA         | 87.0nA  |
| 電流    | 2047      | 16.3735mA | 16.3745mA | 16.3771mA | 2.31μA          | 385nA   |
| 電流    | 4095      | 25.5622mA | 25.5633mA | 25.5647mA | 2.30μA          | 383nA   |
| 電圧    | 0         | 0.2895V   | 0.2895V   | 0.2895V   | 36.6μV          | 6.09μV  |
| 電圧    | 2047      | 6.2821V   | 6.2825V   | 6.2830V   | 717μV           | 120μV   |
| 電圧    | 4095      | 11.6846V  | 11.6850V  | 11.6855V  | 775μV           | 129μV   |

全体として、このヒストグラム プロットは、この種の信号に対して想定されるガウス分布を示しており、発振やその他の信号の乱れはみられません。これは、ウェイク アップ時に MCU が消費するピーク電流がループ上で観測されず、適切にレギュレーションされていることも証明されます。電流出力分解能が 6.2μA で、電圧出力分解能が 3.021mV であるため、電流出力モードおよび電圧出力モードのピークツーピークノイズの計算結果は 1LSB 以内に十分に収まります。

#### 4.3.3 ステップ応答

回路のステップ応答をテストするため、この回路は再び 24V 電源に接続されます。立ち上がりステップ応答では、センサボードで PWM 値を 0 から 4095 に手動で設定し、その際の電流の過渡応答をオシロスコープで測定します。その後、このプロセスを繰り返し、PWM を手動で 4095 から 0 に設定することで、降圧応答をキャプチャします。

図 4-15 に包括的な設定を示します。

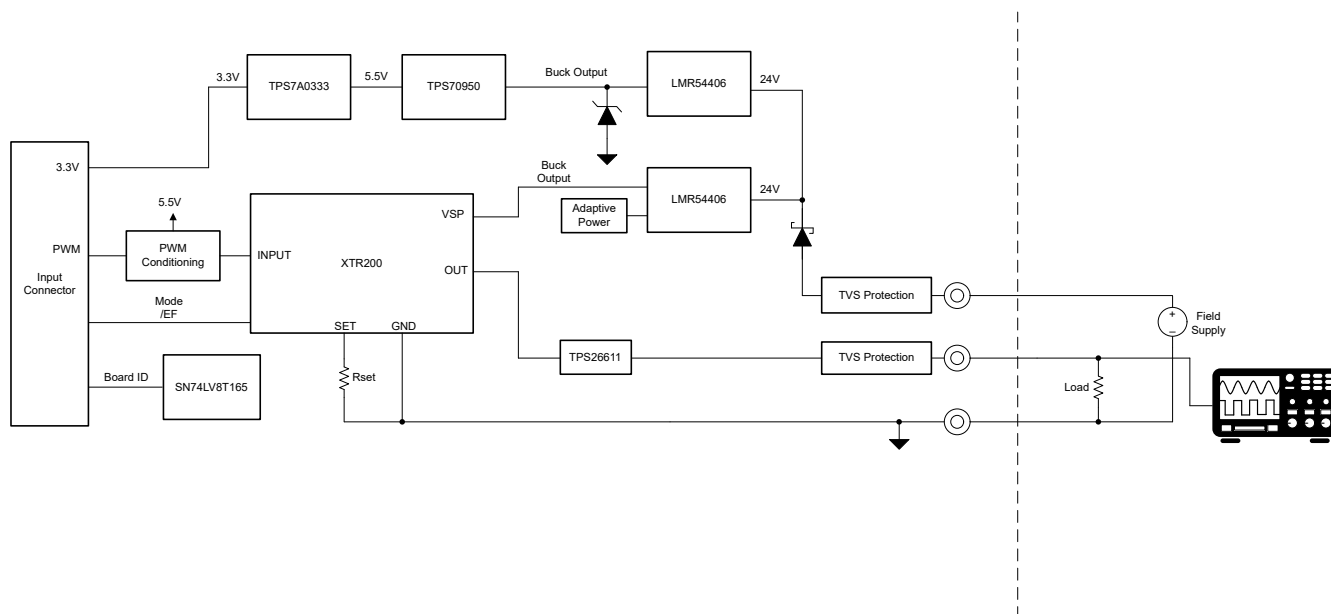


図 4-16 から 図 4-19 の図は電流のステップ応答を示しています。



表 4-6 に、立ち上がり時間と立ち下がり時間のまとめを示します。スコープ波形に示すように、両方の出力モードでの立ち上がりステップ応答にわずかなオーバーシュートが発生しています。これは、4 次バターワース LPF を備えた PWM フィルタ回路によるものです。この場合、このオーバーシュートはシステムに問題を引き起こさないことを想定しています。必要

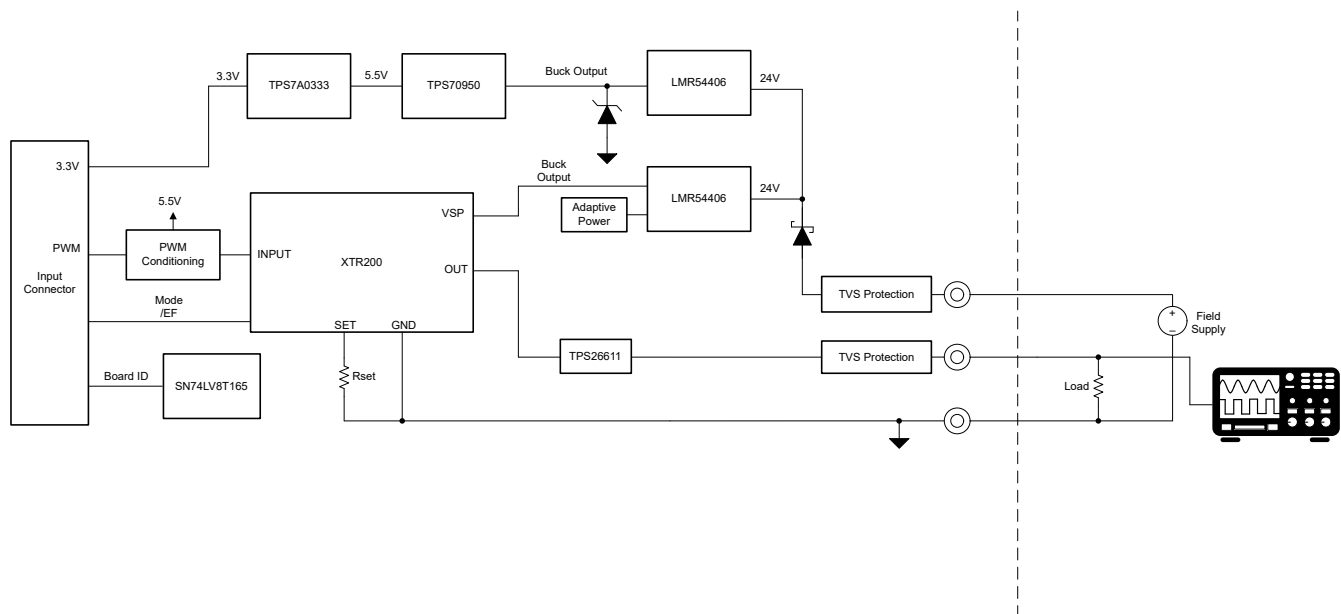
に応じて、ベッセル フィルタ アーキテクチャを採用することで、より緩やかなステップ 応答となるようにアーキテクチャを変更できます。

**表 4-6. 立ち上がり時間と立ち下がり時間のまとめ**

| 出力<br>モード | PWM<br>設定                                | 立ち上がり時間 (μs) | 立ち下がり時間 (μs) |
|-----------|------------------------------------------|--------------|--------------|
| 電流        | 0 ~ 4095 (立ち上がり時間)<br>4095 ~ 0 (立ち下がり時間) | 160          | 158          |
| 電圧        | 0 ~ 4095 (立ち上がり時間)<br>4095 ~ 0 (立ち下がり時間) | 192          | 196          |

#### 4.3.4 スタートアップ

フィールド電源投入時に、不安定な動作やその他の問題が発生することなく、適切なパワーアップ シーケンスで起動することを確認するため、システムの起動動作についてもテストしています。テストのため、基準としてフィールド電源のオシロスコープ波形 (電源投入時)、XTR200 に電力を供給する降圧コンバータ、2 段目の降圧コンバータから給電される 3.3V LDO 出力、およびモジュール出力を取得します。



**図 4-20. 起動測定の設定**

図 4-20 の構成を使用して測定を行うと、図 4-21 と図 4-20 に示すスコープ波形が得られます。

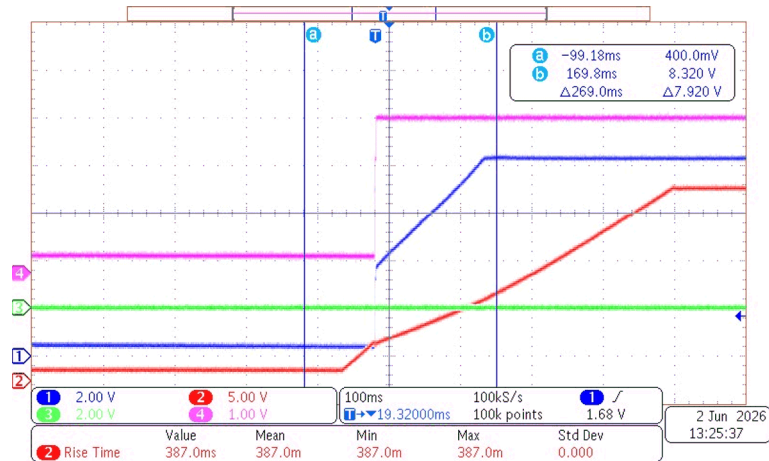


図 4-21. 電流出力モードの起動

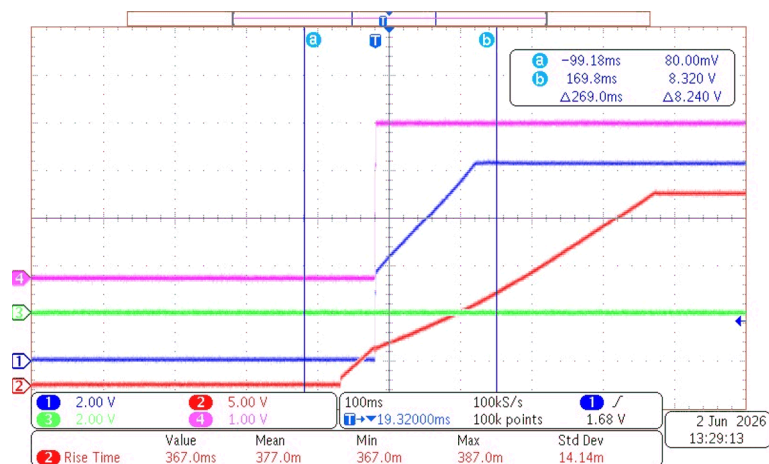


図 4-22. 電圧出力モードの起動

これらのスコープ波形に示すように、デバイスに電力を供給できるだけの電圧が得られ、電圧をレギュレーションできると、降圧コンバータと LDO は両方とも安定して上昇します。また、いずれの動作モードでも、モジュールの起動による影響はモジュール出力に現れず、モジュールやフィールドトランスミッタに接続された負荷が損傷しないことを確認しています。

## 5 設計とドキュメントのサポート

### 5.1 デザイン ファイル

#### 5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-011026](#) のデザイン ファイルを参照してください。

#### 5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-011026](#) のデザイン ファイルを参照してください。

#### 5.1.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

##### 5.1.3.1 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-011026](#) のデザイン ファイルを参照してください。

### 5.2 ツールとソフトウェア

#### ツール

##### [XTR200EVM](#)

3 線式の電流または電圧システム向け高電圧、高精度出力ドライバ XTR200 の評価基板です。

##### [LP-MSPM0G3507](#)

MSPM0G3507 80MHz Arm® Cortex®-M0+ マイコン向け LaunchPad™ 開発キット

#### ソフトウェア

##### [MSPM0-SDK](#)

MSPM0 ソフトウェア開発キット

### 5.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス インスツルメンツ『[XTR200 高精度、3 線式、電流および電圧トランスミッタ](#)』データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『[TPS7A03 ナノパワー  \$I\_Q\$ 、200nA、200mA、高速過渡応答の低ドロップアウト電圧レギュレータ](#)』データシート
3. テキサス インスツルメンツ『[TPS709 150mA、30V、1μA  \$I\_Q\$  電圧レギュレータ、イネーブル付き](#)』データシート
4. テキサス インスツルメンツ、『[TVS3301 33V 双方向フラット クランプ サージ保護デバイス](#)』データシート
5. テキサス インスツルメンツ、『[SN74LV8T165 パラレル ロード 8 ビット シフト レジスタ](#)』データシート
6. テキサス インスツルメンツ、『[TPS2661x: 50V、汎用 4 ~ 20mA、±20mA 電流ループ プロテクタ、入力 / 出力誤配線保護機能付き](#)』データシート
7. テキサス インスツルメンツ『[OPAx991 40V レール ツー レール入出力、低オフセット電圧、低ノイズ オペアンプ](#)』データシート
8. テキサス インスツルメンツ、『[TLV930x 40V、1MHz、RRO オペアンプ、コスト重視システム向け](#)』データシート
9. テキサス インスツルメンツ、『[LMR544xx SIMPLE SWITCHER パワー コンバータ、4V ~ 45V、0.6A/1A 降圧コンバータ、SOT-23 パッケージ](#)』データシート

### 5.4 サポート・リソース

[テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラム](#)は、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

### 5.5 商標

E2E™, LaunchPad™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 6 著者について

**Simon Rojas Avila** は、テキサス インスツルメンツのシステム エンジニアであり、産業用部門でのリファレンス デザイン 開発を担当しています。**Simon** は、アナログ信号チェーン設計、半導体ベースのセンシング、機能安全に関する経験を持っています。彼はテキサス州ラボックのテキサス工科大学で電気電子工学の学士号を取得しています。

## 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黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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](https://www.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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月