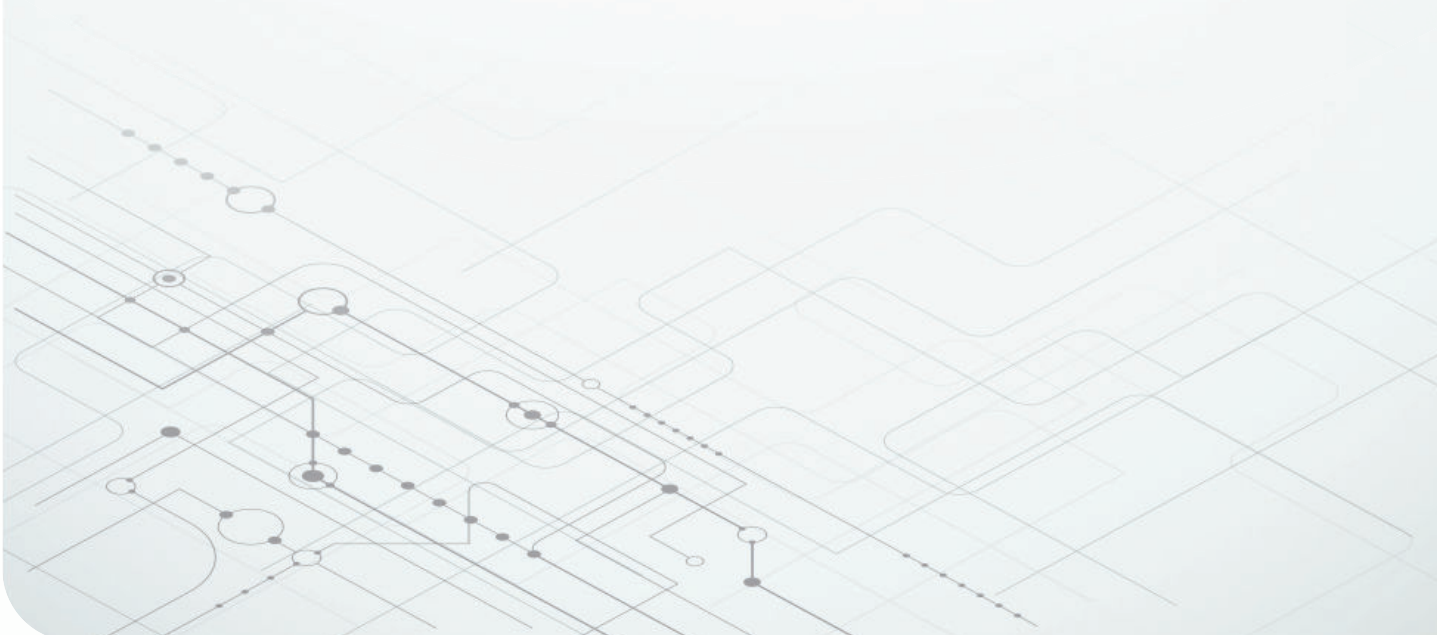


# 低ノイズ電源デバイスによる電源アーキテクチャの簡素化

---



**Marcoo Zamora**  
System Engineer  
Linear Power



# 要求の厳しい電子システムで高精度シグナル チェーンを実現するには、固有ノイズとシステム ノイズの低減が不可欠です。低ノイズ電源デバイスのイノベーションは、システム ノイズの低減や精度と正確度の向上に貢献します。

## 概要



### 電源アーキテクチャにおけるノイズと精度の定義

1

ノイズは多くの場合、アプリケーション固有ですが、このホワイト ペーパーの文脈では、ノイズとは、最大で約 100kHz の熱ノイズや 1/f ノイズ、低周波数発振に起因するあらゆる不要な信号のことです。



### 低ノイズと低消費電力の電圧リファレンスのイノベーション

2

電源アーキテクチャでノイズを低減すると、A/D コンバータの分解能と精度の向上に役立ちますが、消費電力、プリント回路基板 (PCB) のサイズ、製造フロー、コストなど、設計上の課題が発生します。



### 高精度バッテリー監視のイノベーション

3

シリコン テクノロジー分野の独創的なソリューションにより、電源アーキテクチャとバッテリーシステムの最適化が可能となります。

分解能と精度のトレードオフを解消していくことが業界のトレンドとなっている中、シグナル チェーンで最小のノイズを実現することは大変重要です。このトレードオフを解消していく際に重要なのは、A/D コンバータ (ADC) やアンプのようなシグナル チェーン部品のノイズだけでなく、スイッチング レギュレータや低ドロップアウト レギュレータ (LDO) のような電源製品のノイズも考慮することです。シリコン テクノロジーの進歩により、電源トポロジで低ノイズと高精度を実現しようとする場合のトレードオフが減少しています。

24 ビット デルタ シグマ ADC の最近のトレンドでは、サンプリング速度の向上と消費電力の低減が進んでいます。低ノイズ

の新しい電源と低ノイズの電圧リファレンスは、これらのトレンドを利用して、低消費電力アプリケーションでの高分解能測定を ADC が実現するのに役立っています。

ノイズを最小限に抑えるために、シグナル チェーンと電源アーキテクチャにおけるノイズの発生源を再確認してみましょう。図 1 に、外部電圧リファレンス、クロック、シグナル コンディショニング回路を必要とする ADC を中心とした代表的なシグナル チェーン アプリケーションを示します。図 1 のすべての部品はシステム ノイズの一因となっており、最適化が必要です。

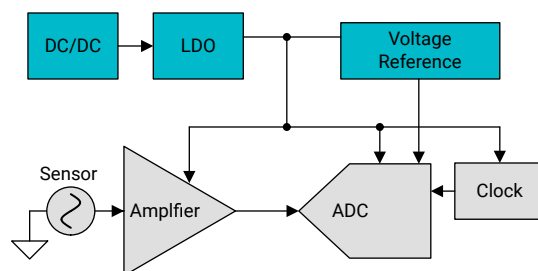


図 1. 一般的なシグナル チェーンの電源アーキテクチャ

## ノイズと ADC

ADC 内のノイズは、高精度の電圧測定で誤差を引き起こす可能性があります。内部および外部の発生源からのシグナル チェーン内のノイズの寄与の合計を考慮する必要があります。合計ノイズは多くの場合、ADC 熱ノイズ、ADC 量子化ノイズ、アンプ ノイズ、電圧リファレンス ノイズ、電源ノイズの組み合わせです。

図 1 に基づいてセンサを測定する際の、ADC の入力 (フルスケール電圧時) での換算ノイズの合計を、式 1 に示します。設計上の主な課題は、アプリケーションが必要とするノイズ目標を達成するためにすべてのノイズ源を最適化することで

す。式 1 では、ADC の電源除去比 (PSRR) によって電源ノイズが低減され、これが 1 MHz にプロットされます。

$$\text{ADC 合計 ノイズ} = \sqrt{\text{ADC 熱 ノイズ}^2 + \text{ADC 量子化 ノイズ}^2 + \left( \text{電源 ノイズ} \times 10^{\frac{\text{PSRR}}{20}} \right)^2 + \text{電圧 リファレンス ノイズ}^2} \quad (1)$$

無相関のノイズ源が存在する場合、合計ノイズはすべてのノイズ源の二乗和平方根となり、最大のノイズ源の寄与が大きく強調されます。1 つのノイズの多い部品が、測定値に大きな歪みを生じさせる可能性があります。たとえば 図 2 と 図 3 に示すように、電圧リファレンスのノイズの寄与が ADC や電源よりも大きい場合、電圧リファレンスのノイズを低減するのがシステムノイズを低減する最善の方法になります。さらに ADC ノイズの種類は分解能によって異なります。量子化ノイズは 16 ビット ADC では重要ですが 24 ビット ADC では無視できます

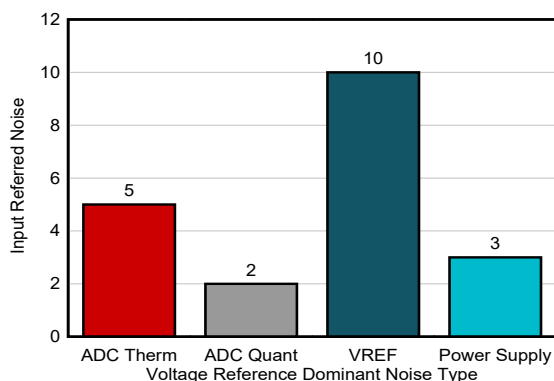


図 2. 電圧リファレンスの支配的なノイズ

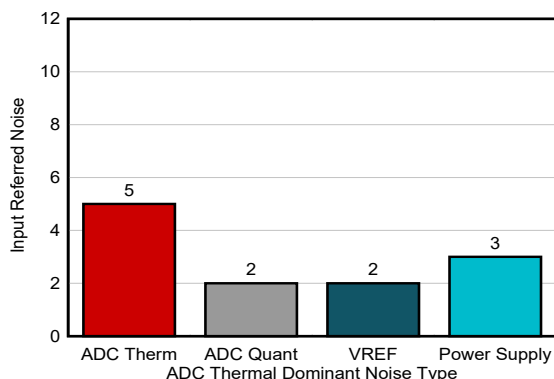


図 3. 支配的な ADC 熱ノイズ

## 電源アーキテクチャにおけるノイズと精度の定義

電源ノイズはランダムであり、あらゆる半導体のパワーデバイスや電源トポロジで発生します。このホワイトペーパーでは 100kHz 未満の信号に注目します。これを上回る信号は多くの場合、スイッチングリップルまたは電磁干渉 (EMI) に起因するからです。図 4 に示すように、さまざまな要件と設計上の課題により、ノイズを低周波ノイズ (0.1Hz から 10Hz) と高周波ノイズ (100Hz から 100kHz) に分けることもできます。

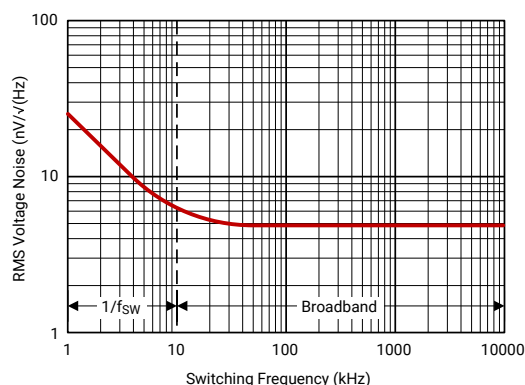


図 4. ノイズ周波数スペクトル

低周波ノイズは多くの場合、シリコンの特性と設計アーキテクチャの組み合わせにより、半導体デバイスが自然に生成する 0.1Hz から 10Hz の範囲のピークツーピークノイズと定義されます。図 5 に示すように、この低周波ノイズは通常、高分解能で電圧レールを拡大するとオシロスコープで確認することができ、高精度 DC 測定では多くの場合誤差の原因となります。低周波ノイズの仕様が不可欠である ADC アプリケーションとしては、バッテリー測定、エネルギー測定、地震測定、さらには半導体試験測定などがあります。

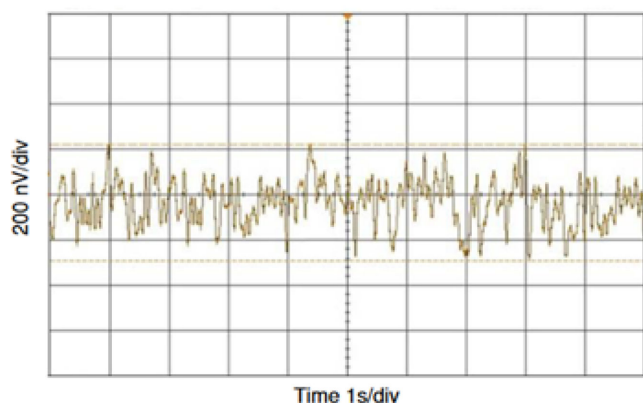


図5. オシロスコープに表示した低周波ノイズ

もう一つは高周波ノイズであり、図6に示すような100Hzから100kHz帯の、ホワイトノイズ、スイッチングノイズ、クロックジッタなどが含まれます。また、高周波ノイズ源としては、EMIによる結合を通じて、環境から発生することもあります。例えば、ノイズの多い電源からADCのエラーが発生する可能性があります。同様にノイズの多い電源からのEMIは、クロックジッタを増加させる可能性があり、これが大きい場合、信号対雑音比が低下する可能性があります。

ジッタの影響を受けやすいデジタル回路では、クロック周波数の上昇に起因する高周波ノイズを低減することがますます重要になっています。高周波ノイズが重要な仕様であるADCアプリケーションには、電力線品質モニタ、デジタル信号処理アプリケーション、無線周波数(RF)通信機器などがあります。

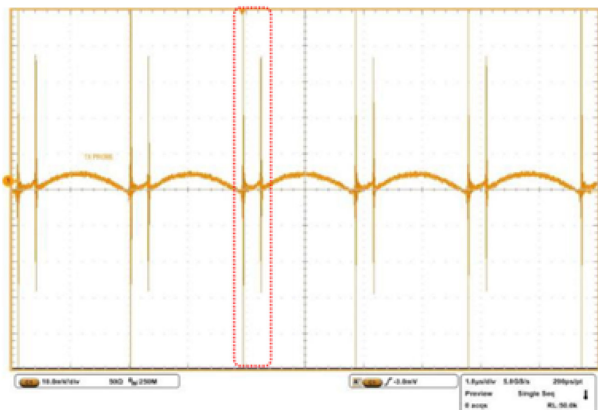


図6. 降圧レギュレータのスイッチングノイズ

## 低ノイズと低消費電力の電圧リファレンスのイノベーション

ノイズを低減する1つの方法はシステムの電力を増やすことですが、多くの場合、電力バジェットが存在するため、限られた電力でノイズ性能を最大化する必要があります。テキサス・インスツルメンツの低ノイズ電圧リファレンスの製品ラインアップは、REF33、REF34、REF35の各ファミリなどの低消費電力オプションを含み、高精度の低消費電力ADCで電力とノイズの境界を広げることができます。静止電流( $I_Q$ )が低い電圧リファレンスは、電力バジェットが限られている2線式トランスミッタなど、携帯用またはエッジ側アプリケーションにメリットがあります。

効率的なバンドギャップ回路と出力バッファのイノベーションにより、電圧リファレンスの電力/ノイズ比が向上しています。REF33、REF34、REF35は、低ノイズと低消費電力を実現するテキサス・インスツルメンツの電圧リファレンス製品ラインアップの主要デバイスです。図7は、ノイズと消費電力を比較し、REF35の革新性を強調しています。

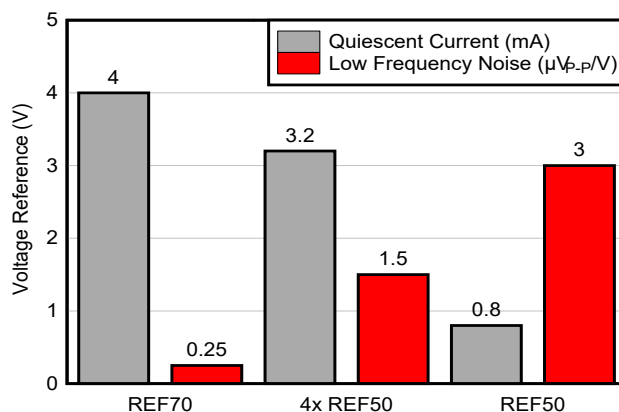


図7. 電圧リファレンス電力とノイズ

低ノイズの一般的なアプリケーションの1つは、携帯型心電図装置などの携帯型医療機器です。24ビットADCのADS124S08ファミリは消費電力がわずか280µAであるため、電力バジェットが限られているフィールド機器やエッジデバイスの電力消費を最小限に抑えることができます。表1はREF35を内蔵のADS124S08電圧リファレンスと比較し、 $I_Q$ による精度が向上していることを明確に示すものです。REF35の低ノイズと高精度は、システムの消費電力を低減しながら、量子化誤差とゲイン誤差の両方を改善します。電圧リファレンスの電圧がフレキシブルであることにより、

ADS124S08 のフルスケール レンジを最大化するためのさらなる最適化が可能です。

| デバイス           | REF35                     | ADS124S08 内部電圧リファレンス    |
|----------------|---------------------------|-------------------------|
| 電圧レベル          | 1.25 V ~ 5 V              | 2.5V                    |
| 低周波ノイズ         | 8.5 $\mu$ V <sub>PP</sub> | 9 $\mu$ V <sub>PP</sub> |
| I <sub>Q</sub> | 0.65 $\mu$ A              | 280 $\mu$ A             |

表 1. 外部電圧リファレンス対、内部電圧リファレンス

REF35 は、低消費電力で DC 精度を重視した ADC である **ADS127L11** と組み合わせられます。**REF35** は REF34 に比べて消費電流が 1/10 であるため、低速モードでは ADS127L11 と最適な組み合わせとなります。この組み合わせにより、ADS127L11 は高精度を必要とする電力品質アナライザ システム、またはソリューション サイズ、分解能、帯域幅のバランスを取るために低消費電力を必要とする機械振動システムで高精度を実現できます。

## 超低ノイズ電圧リファレンスのイノベーション

高分解能 ADC は、より電圧リファレンス ノイズの影響を受けやすく、データ変換回路に直接接続されているため、電圧測定に直接影響を及ぼします。超低ノイズの電圧リファレンスは、高分解能 ADC の性能を最大限に発揮するのに役立ちます。**REF70** は超低 1/f ノイズを実現しており、高分解能 ADC などの超低ノイズを必要とする製品や、**AFE2256** などのマルチチャンネル アナログ フロント エンドに接続できます。**図 8** に示すように、電圧リファレンスの出力にローパス フィルタを追加すると、広帯域ノイズが低減し、システム ノイズも減少します。

ローパス フィルタを設計するときは、出力インピーダンスによって AC 性能が低下しないようにすることが重要です。これは、出力電流変動により、大きな直列抵抗が負荷過渡に影響を与える、RC ローパス フィルタで発生する可能性があります。広帯域ノイズの影響を制限するため、10Hz 未満のローパス フィルタ帯域幅カットオフ周波数を選択します。

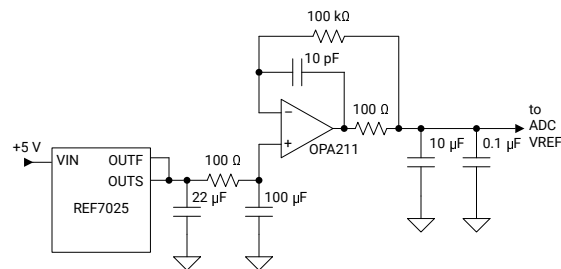


図 8. 外部ローパス フィルタ付き REF7025 アプリケーション

## 簡素化した電源アーキテクチャによるノイズ特性と放熱特性の改善

クロック、データ コンバータ、アンプに電力を供給する従来の構成は、**図 9** に示すように、DC/DC コンバータ (またはモジュール) の後段に LDO、さらにその後段にフェライト ビーズ フィルタを配置するものでした。この設計のやり方で、電源から負荷に伝わるノイズとリップルの両方を最小化でき、負荷電流がおおむね 2A 以下の場合には適切に動作します。ただし、負荷が大きくなるほど、LDO で生じる電力損失が原因で、効率と放熱管理に課題が生じます。たとえば、標準的なアナログ フロント エンド アプリケーションでは、ポスト (後段) レギュレーション LDO により電力損失が 1.5W 増加する可能性があります。

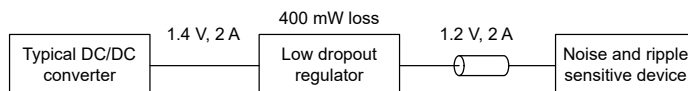


図 9. DC/DC コンバータ、LDO、フェライト ビーズ フィルタを使用する標準的な低ノイズ アーキテクチャ

標準的な電源アーキテクチャにおける LDO の利点は、高 PSRR により高周波ノイズ領域のスイッチング ノイズを低減しながら、高精度の電圧レールを提供できることです。LDO を使用する場合のトレードオフは、発熱と消費電力の増加です。電力損失を制御しながら低ノイズを確保する効果的な方法は、**図 10** に示すように LDO を電源設計から全面的に排除し、低ノイズの DC/DC 降圧コンバータまたは降圧モジュールを使用することです。LDO を使用しないこのデザインは、低ノイズを達成しながら、電力損失を低減し発熱を改善します。

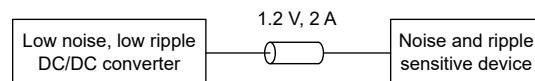
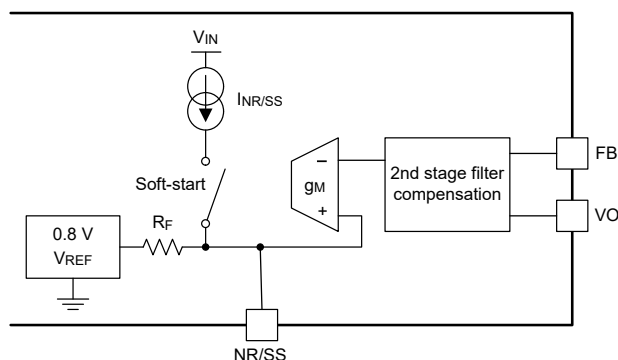


図 10. LDO なしで低ノイズ降圧コンバータを採用

**TPS62912** と **TPS62913** で構成される低ノイズ降圧コンバータファミリや、**TPSM82912** と **TPSM82913** の各モジュールは、ノイズ低減 / ソフト スタート ピンを実装しており、ここに 1 個のコンデンサを接続して、**図 11** に示すように、内蔵の  $R_F$  と、外部接続コンデンサ  $C_{NR/SS}$  を組み合わせてローパス RC フィルタを形成します。この実装は本質的に、LDO のバンドギャップ ローパス フィルタの動作を模倣しているため、出力電圧リップルを  $10\mu V_{RMS}$  未満に抑えることができます。また、TPS62913 は、2.2MHz のスイッチング周波数とオプションの 2 段階フェライト ビーズ LC フィルタを活用することで、標準的なスイッチング ノイズが存在しない高周波領域でも低ノイズフロアを実現できます。



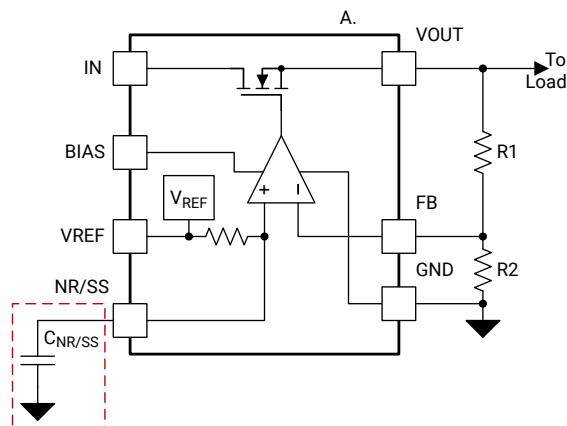
**図 11.** バンドギャップ ノイズ フィルタリング を実行する低ノイズ降圧コンバータのブロック図

**ADC12DJ5200RF** は、4W の消費電力で DC から 10GHz の範囲をサンプリングする RF サンプリング ADC です。PSRR は電源のリップルとノイズを減衰させますが、残留リップルとノイズが ADC の出力スペクトルに現れ、誤差の原因となります。ADC12DJ5200RF のアナログ電圧レールの電源要件はより敏感なため、低ノイズが必要です。低ノイズおよび大電力のアナログ レールに TPS62912 を使用すると、DC/DC と LDO の組み合わせに比べて電力損失を最小化しながら、簡素化された効率的な電源アーキテクチャを可能にします。

## LDO 電源レールによる大電流、低ノイズ

LDO 固有の最大のノイズ源は内部電圧リファレンスです。ノイズを低減し、全体のシステム性能を向上させるために、テキサス・インスツルメンツの製品ラインアップのさまざまな LDO に NR ピンによるノイズ低減機能が組み込まれています。**図**

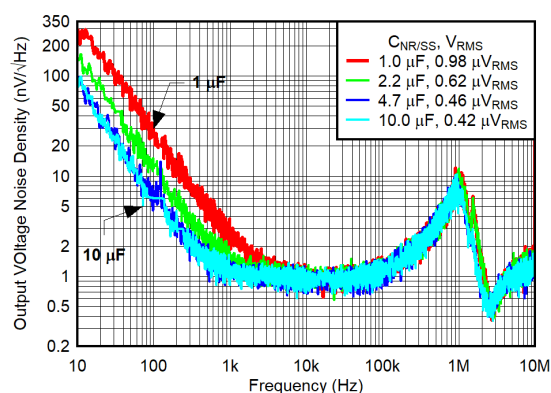
**12** に示すように、NR ピンにコンデンサ ( $C_{NR/SS}$ ) を追加すると、 $V_{REF}$  ノードに内部抵抗を持つ RC フィルタが形成されます。



**図 12.** NR/SS ピンを備えた N チャンネル金属酸化膜半導体 LDO

$$A. \quad V_{OUT} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (2)$$

より新しい LDO には、高精度で正確な低ノイズの電流源と、その後段にはエラー アンプが実装されています。ユニティ ゲイン構成を実装すると、出力範囲全体にわたって低ノイズも保証されます。これらの高精度、低ノイズ LDO の適切な例の 1 つは **TPS7A94** で、この製品は 10Hz から 100kHz の帯域幅で  $0.46\mu V_{RMS}$  を実現できます。**図 13** に、出力ノイズ密度と、 $C_{NR/SS}$  を  $1\mu F$  から  $10\mu F$  に増加させた場合の影響を示します。



$$V_{OUT} = 3.3V$$

$$C_{IN} = C_{OUT} = 10\mu F$$

$$I_{OUT} = 500mA$$

$$10Hz \leq f_{SW} \leq 100kHz$$

**図 13.** TPS7A94 の出力ノイズ対  $C_{NR/SS}$

TPS7A94 が備える機能の組み合わせは、優れた電圧精度と超低ノイズを実現できる新世代の低ノイズ LDO の代表例です。これは、高分解能の ADC はノイズの影響を受けやすいため、TPS7A94 が高分解能シグナル チェーンの主電源である場合に重要です。図 14 に示す代表的なアプリケーションで、TPS7A94 は高性能デバイスである ADC やオペアンプ、クロック、外部電圧リファレンスの主電源です。このシグナル チェーンの目標は、TPH210 および REF70 の低い  $1/f$  ノイズによる超低入力電流ノイズを使用して、ADS127L11 の全高調波歪みとゲイン誤差を最小化し、信号対雑音比を最大化することです。TPS7A94 の低ノイズと高 PSRR はクリーンな電源ラインを提供し、TPS210、ADC127L11、REF70 のアクティブ回路に結合して性能を低下させる可能性のある、すべてのノイズを制限します。

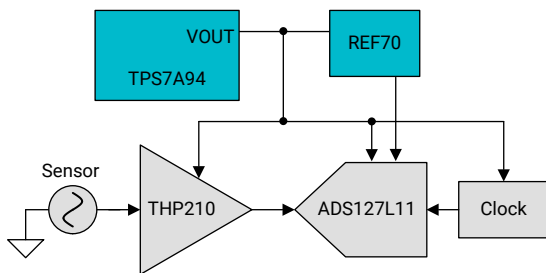


図 14. シグナル チェーンに電力を供給する TPS7A94

## 高精度バッテリー監視のイノベーション

電気自動車用のバッテリー モニタである BQ79718-Q1 は、セル電圧の測定精度が 1mV です。このように精度と正確度が高いため、自動車の OEM メーカーは EV バッテリー パックのコストや容量を増やさずに、航続距離を延ばすことが可能です。予想されるとおり、温度や寿命によるドリフト、電源ノイズ、基板の曲げに起因するダイ ストレスなど、多くのシステム要因や環境要因が電圧測定の不正確さに寄与しています。

テキサス・インスツルメンツは、環境への影響を低減し、より高精度な電圧測定を実現するために、単一のダイにいくつかのテクノロジーを組み込んでいます。次に例を示します。

- 埋め込みツェナー ダイオードは、埋め込み接合部を表面より十分に下に保持し、ホット キャリアの影響を受けにくくしています。このダイオードは、集積回路 (IC) の温度と寿命全体にわたって非常に安定した電圧リファレンスを実現します。

- バッテリー モニタを PCB に半田付けする場合、PCB の反りによってダイがわずかに曲がるため、電圧測定の精度が低下します。内蔵のひずみゲージは、この曲げを測定し、電圧の測定値を補正します。
- 内蔵のセル バランシング電界効果トランジスタと電源により、ダイの温度が上昇し、温度偏差に起因する電圧測定誤差が生じます。BQ79718-Q1 は温度センサを内蔵しているため、温度範囲全体にわたって電圧測定の較正を行うことができ、最高の精度を確保できます。

BQ79718 や BQ79731-Q1 のような特定用途向け IC は、システム レベルの問題をシングルチップで解決するのに役立ち、システム設計者は市場投入までの期間を犠牲にせずに、最高の性能を実現できます。

## まとめ

低ノイズ ADC やアナログ フロント エンド向けの従来の低ノイズ電源アーキテクチャは、多くの場合、消費電力と放熱性能の課題に直面します。低ノイズの電圧リファレンスと電源を用いて設計することで、電源アーキテクチャを簡素化し、厳しい電力バジェットを満足することが可能となります。REF35 のような電圧リファレンスのイノベーションは、エッジ デバイスのノイズ低減と消費電力削減を新しいレベルに引き上げる手助けとなります。RF サンプリング ADC のようなノイズに敏感なアプリケーションでは、TPS62913 などの低ノイズのスイッチングレギュレータにより、LDO を使用する従来のスイッチングレギュレータに比べて発熱を低減できます。

## その他の資料

- 低ノイズと精度の詳細については、「[低ノイズと高精度](#)」を参照してください。
- 技術記事『[低ノイズと低リップルを重視した設計手法を活用し、パワー インテグリティ \(電力品質\) とシグナル インテグリティを強化する方法](#)』をお読みください。
- e-book『[精度に関する基礎、ADC ノイズ分析](#)』および『[LDO の基礎](#)』をダウンロードしてください。
- アプリケーション ノート『[TPS62913 低リップルおよび低ノイズ降圧コンバータによる高感度 ADC への電力供給の設計](#)』および『[TPS62913 低リップルおよび低ノイズの降](#)』

[圧コンバータによる AFE7920 への電力供給](#)』を参照してください。

- ホワイト ペーパー『[バッテリー管理システムのイノベーションによる EV 採用の増加](#)』をご覧ください。

**重要なお知らせ:**ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 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](#)、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 © 2023, Texas Instruments Incorporated