

## Application Note

## TIC12400-Q1 の ADC 入力リーケージとサンプリング動作について



Frank Qin

## 概要

このアプリケーション ノートでは、0mA ウェット電流モードに設定されている場合に TIC12400-Q1 マルチ スイッチ検出インターフェイス (MSDI) の INx ピンで観測される入力リーケージおよびサンプリング動作について説明します。基礎となるメカニズムを、内部 ADC フロントエンド アーキテクチャに関連して分析し、予測可能で正確な ADC 測定を実現するための実用的なシステムレベルの設計ガイドラインを示します。

## 目次

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1 はじめに.....                         | 2 |
| 2 オンチップ ADC フロントエンド アーキテクチャの概要..... | 2 |
| 3 データシートの $I_{LKG}$ 仕様について.....     | 3 |
| 3.1 $\pm 110\mu A$ 仕様の解釈.....       | 3 |
| 3.2 リーク電流はマルチプレクサで起動、時間制限あり.....    | 3 |
| 4 弱電圧源における設計上の検討事項.....             | 5 |
| 4.1 弱電圧源の定義.....                    | 5 |
| 4.2 サンプリング スパイクのメカニズム.....          | 5 |
| 5 定量モデルと誤差の推定.....                  | 6 |
| 5.1 サンプリング時間中の電圧ステップ.....           | 6 |
| 5.2 ハイインピーダンスソースを使用した定常状態オフセット..... | 6 |
| 6 設計上の緩和方法.....                     | 7 |
| 6.1 方法 1: 電圧源の強化.....               | 7 |
| 6.2 方法 2: 外部 RC 補償 (推奨).....        | 7 |
| 6.3 方法 3: 静的オフセット較正.....            | 7 |
| 7 まとめ.....                          | 8 |
| 8 参考資料.....                         | 8 |

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

TI の TIC12400-Q1 は、車載用車体制御モジュール (BCM) やゾーン制御モジュール (ZCM) で広く使用されている高集積マルチ スイッチ検出インターフェイス (MSDI) です。このデバイスは、プログラマブル ウェット電流源、オンチップ コンパレータ、10 ビット ADC を組み合わせて、スイッチとセンサを監視します。ポーリングベースのアーキテクチャにより、ホスト MCU はスイッチスキャン サイクル間も低消費電力のスリープ状態を維持できます。これは、消費電力が重要な意味を持つ車載設計において、システムレベルの重要な利点となります。

オンチップ ADC は主に、抵抗コード化アナログ スイッチと組み合わせて使用することを意図しており、プログラマブル ウェット電流は外部抵抗ネットワークを通して流れ、INx ピンでそれに比例する電圧を生成します。ただし、一部のアプリケーションでは、システムの制約により、INx 電圧をパッシブ抵抗デバイダ、スライド レオスタット、または同様のハイインピーダンス ソースにより直接供給し、TIC12400-Q1 のウェット電流を 0mA に設定する必要があります。これらの構成では、エンジニアによって次の動作が確認されています。

- ADC 変換結果で、読み取り値が定常状態入力電圧の期待値よりも高くなること
- 各サンプリング サイクルに同期された INx ピンの電圧スパイクが狭いこと
- INx ピンに接続された外部 RC フィルタ部品の感度が向上すること

このアプリケーション ノートでは、TIC12400-Q1 の内部 ADC フロントエンド アーキテクチャに即してこれらの観測結果の根本原因を説明し、結果として生じる測定誤差を推定する定量モデルを提供し、このような構成でデバイスを確実に使用できるようにするための実用的な低減アプローチについて説明します。

## 2 オンチップ ADC フロントエンド アーキテクチャの概要

INx ピンで観測される動作を正しく解釈するには、内部信号チェーンの基本を理解する必要があります。図 2-1 に TIC12400-Q1 の機能ブロック図を示します。ここでは、ADC フロントエンド パスが強調表示されています。

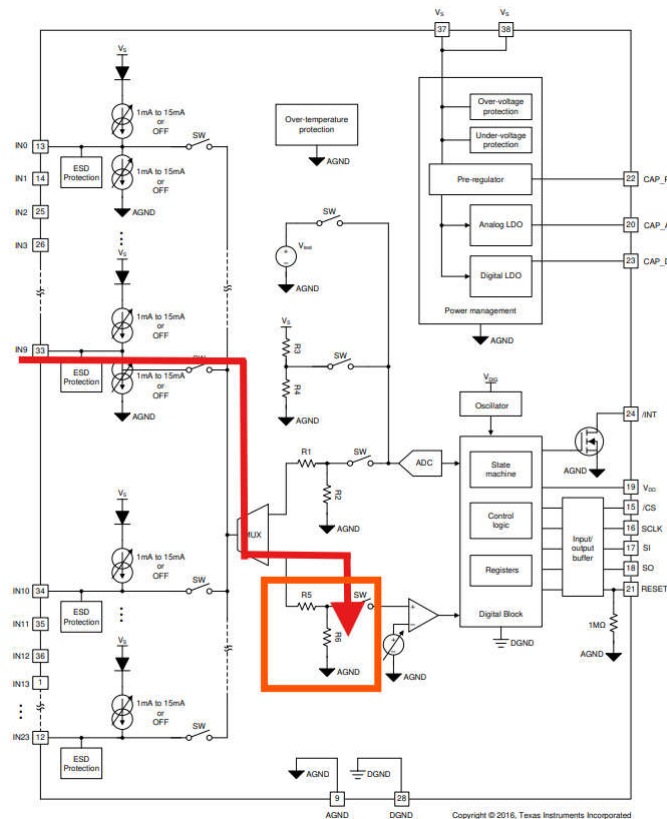


図 2-1. TIC12400-Q1 の機能ブロック図 (ADC フロントエンド信号路を強調表示)

INx の各入力ピンは、内部マルチプレクサ (MUX) を介して ADC またはコンパレータに配線されます。ADC 信号路では、内部の抵抗分圧器が、変換前に外部入力電圧を ADC 入力範囲に対応するレベルまで低下させます。この構造には、いくつかの重要なアーキテクチャ特性があります。

- 内部の分圧器は、INx チャンネルが ADC に割り当てられるときは常に存在します。これにより、ウェット電流の設定に関係なく、マルチプレクサのアクティブ時間中は常に INx ピンに負荷が形成されます。
- ADC は、内部分割ノードの電圧ではなく、INx ピンの電圧を報告するよう工場出荷時に較正されています。つまり、6V のフルスケールレンジは、INx ピンで測定された ADC コード 1023 に対応し、TIC12400-Q1 データシートの変換式と一致しています。
- 設定されているサンプリング時間の期間中、任意の時点で 1 つの INx チャンネルのみが ADC またはコンパレータに接続されています (ADC モードの場合は  $T_{ADC}$ 、コンパレータ モードの場合は  $T_{comp}$ )。その期間中、他のすべてのチャンネルは ADC またはコンパレータから切り離されたままです。

### 3 データシートの $I_{LKG}$ 仕様について

TIC12400-Q1 のデータシートには、ウェット電流が 0mA に設定されているときの、INx ピンでの最大  $\pm 110\mu A$  の入力リーク電流 ( $I_{LKG}$ ) が規定されています。この仕様は、INx ピンに継続的に存在する定常状態の DC リーク電流と誤って解釈されることがよくあります。外部インターフェイス回路を適切に設計するには、この仕様の実際の意味を理解することが重要です。

#### 3.1 $\pm 110\mu A$ 仕様の解釈

$\pm 110\mu A$   $I_{LKG}$  仕様は、すべての量産ユニットにわたる動作条件、電源電圧、温度、内部デバイス状態の全範囲を網羅したワーストケースの限度です。 $\pm$  記号は、マルチプレクサがチャンネルを接続しているときの内部ノード電圧に応じて、電流の方向が INx ピンに流れ込む場合と INx ピンから流れ出す場合の両方の可能性があることを示しています。この値は、外部ソースが供給または吸収する最大過渡電流を制限することを目的としたものであり、標準動作電流または連続動作電流とは解釈しないでください。

#### 3.2 リーク電流はマルチプレクサで起動、時間制限あり

ベンチ測定では、 $I_{LKG}$  電流が INx ピンに継続的に印加されていないことが示されています。印加されるのは、内部マルチプレクサにより、特定の INx チャンネルが ADC またはコンパレータ回路にアクティブに接続された場合のみです。この過渡状態は、設定されたサンプリング時間の期間にわたって持続します。チャンネルが ADC モードに割り当てられている場合は約  $T_{adc}$ 、コンパレータ モードに割り当てられている場合は約  $T_{comp}$  です。これらの時間以外は、INx ピンは内部 ADC フロントエンドから電氣的に絶縁されています。

図 3-1 および図 3-2 に、ADC モードおよびコンパレータ モードでのサンプリング時間中の INx ピン電圧のオシロスコープによるキャプチャ結果を示します。どちらの場合も、ウェット電流が 0mA に設定され、INx ピンでの電圧変動は、INx ノードで外部および寄生容量を充電する過渡マルチプレクサ接続電流によってのみ引き起こされます。重要なのは、ADC とコンパレータの構成を切り替えると、観測される電圧スパイクの振幅ではなく、パルス幅のみが変化することです。そのため、この現象が、外部のウェット電流源ではなく、マルチプレクサと内部 ADC 回路に関連していることが確認できます。

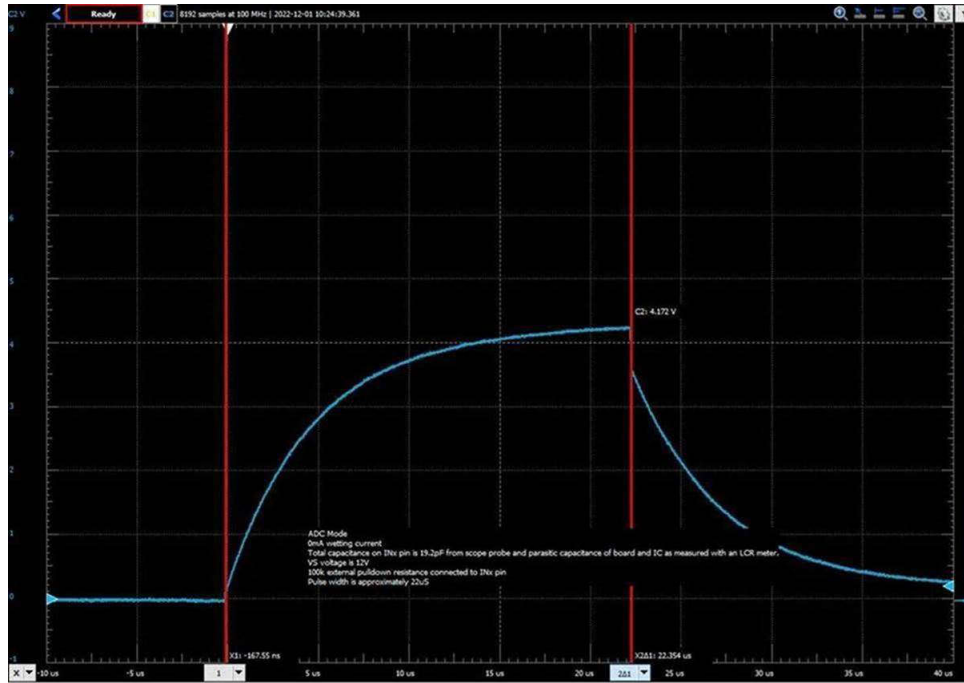


図 3-1. サンプル時間中の INx ピンの電圧:ADC モード

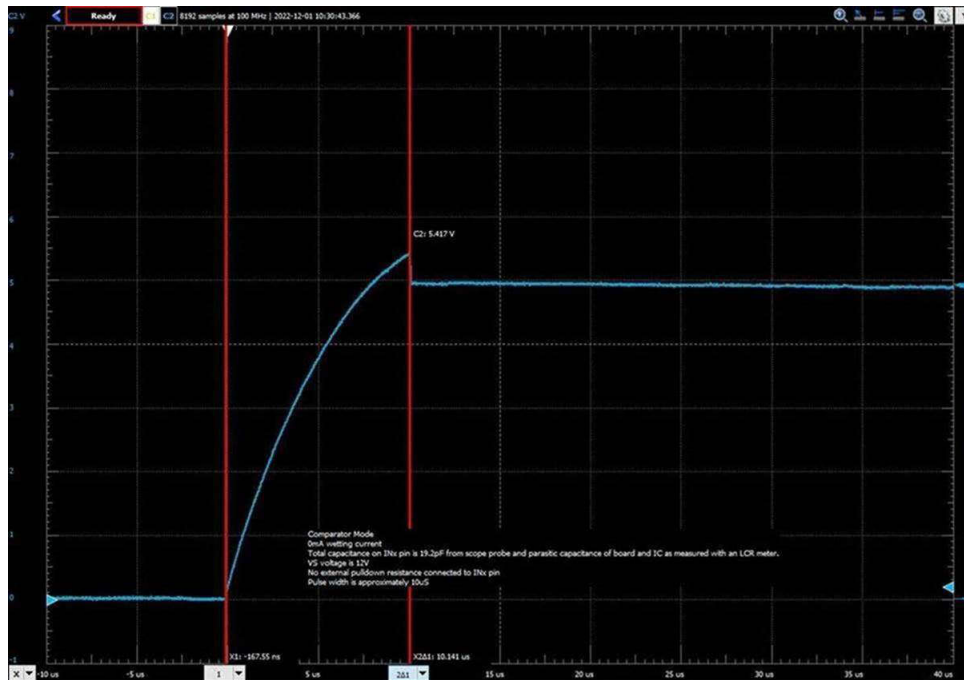


図 3-2. サンプル時間中の INx ピンの電圧:コンパレータ モード

## 4 弱電圧源における設計上の検討事項

### 4.1 弱電圧源の定義

TIC12400-Q1 ADC 入力の場合、弱電圧源とは、DC 電圧レベルを正確に確立できるものの、過渡電流を急速に供給または吸収する能力が制限されている外部ソースと定義されます。車載用 BCM および ZCM アプリケーションの一般的な例は次のとおりです。

- パッシブ抵抗デバイダ ネットワーク (例: 抵抗ラダーから派生した電圧リファレンス)
- 位置センサとして使用されるスライド レオスタット
- アクティブにバッファされていないハイインピーダンス センサまたはトランスデューサ出力

これらのソースは DC 電圧を正確に確立できますが、過渡電流を迅速に吸収したり、供給したりすることはできません。ソース インピーダンスが低い場合 (アクティブ駆動出力の場合と同様)、マルチプレクサ接続電流に起因する過渡電流は急速に吸収され、ADC の読み取り値への影響は無視できる程度です。しかし、ソース インピーダンスが高い場合、ADC 変換時間と重なる可能性のある持続時間だけ電圧偏差が持続し、測定結果に体系的なオフセットが発生します。

### 4.2 サンプリング スパイクのメカニズム

内部マルチプレクサによって INx チャンネルが選択されると、内部分圧器と ADC フロントエンド回路が突然 INx ピンに接続されます。サンプリング時間 ( $T_{\text{adc}}$  または  $T_{\text{comp}}$ ) 中に、 $I_{\text{LKG}}$  の上限までのリーク電流が、INx ノードの総容量に対して印加されます。この総容量 ( $C_{\text{IN}}$ ) には、PCB パターンと TIC12400-Q1 ピンの寄生容量、およびノードに意図的に追加された外部フィルタ コンデンサが含まれます。サンプリング時間の終わりに、マルチプレクサは内部フロントエンドを切り離し、蓄積された電荷は外部ソース インピーダンス ( $R_{\text{EXT}}$ ) を通じて、外部ネットワークによって定義された定常状態の電圧に戻るよう放電されます。図 4 に、複数のポーリング サイクルにわたって INx ピンで測定された狭い電圧スパイクを示します。

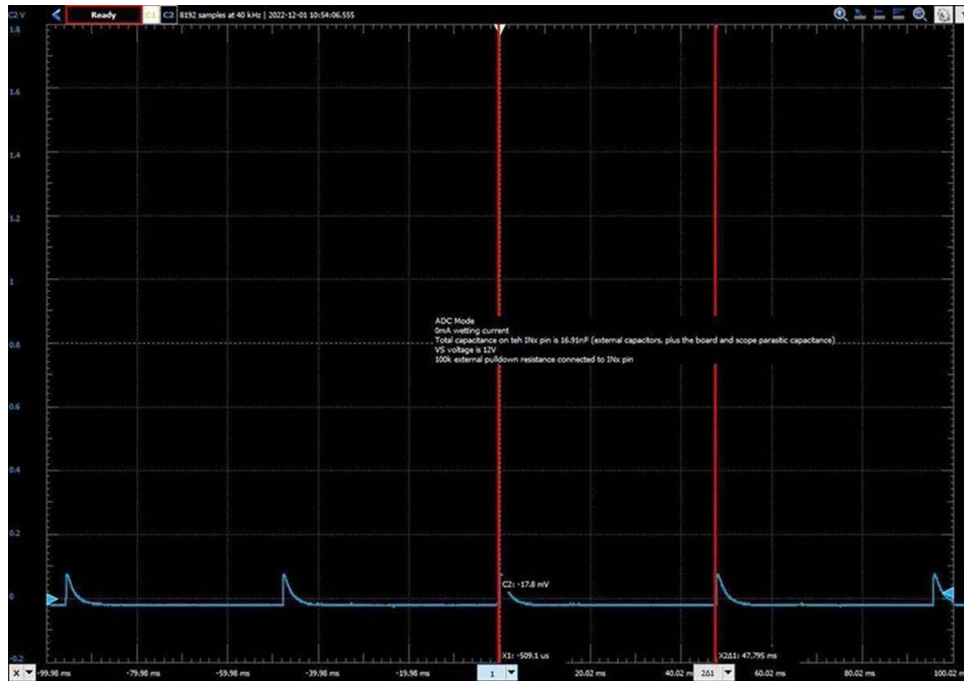


図 4-1. 複数のポーリング サイクルにわたって繰り返し発生する INx の電圧スパイク — ADC モード

リーク電流の印加は各ポーリング イベントで一貫して発生し、 $R_{\text{EXT}} \times C_{\text{IN}}$  の放電時定数はポーリング間隔と比べて長くなる可能性があるため、INx ノードは次のサンプリング イベントまでに定常状態の電圧に完全に回復しない可能性があります。これにより、真の入力電圧に準静的な DC オフセットが重ね合わせられます。

## 5 定量モデルと誤差の推定

マルチプレクサ接続の過渡状態によって生じる電圧偏差は、基本的な RC 充電の原理に基づいて、解析的に推定できます。このモデルでは仮定が単純化されていますが、システム設計マージンの分析を行うための一次推定値として有用です。

### 5.1 サンプリング時間中の電圧ステップ

サンプリング時間中に、リーク電流  $I_{LKG}$  により、INx ピンでの総容量  $C_{IN}$  が充電されます。結果として得られる電圧ステップは、次の式で概算されます。

$$\Delta V \approx \frac{I_{LKG} \cdot T_{sample}}{C_{IN}} \quad (1)$$

ここで、 $I_{LKG}$  はリーク電流 (最大  $\pm 110 \mu A$ )、 $T_{sample}$  は構成に応じて  $T_{adc}$  または  $T_{comp}$ 、 $C_{IN}$  は INx ノードでの総容量です。式 1 は、 $C_{IN}$  を大きくすると、与えられたリーク電流とサンプリング持続時間に対して、 $\Delta V$  が直接低減することを示しています。

### 5.2 ハイインピーダンス ソースを使用した定常状態オフセット

$R_{EXT} \times C_{IN}$  の放電時定数がポーリング期間  $T_{POLL}$  に対して長い場合、INx ノードは連続するサンプリング イベント間に完全に放電しません。連続する各サンプリング イベントによって、前の電荷が完全に消費される前にノードに電荷が追加され、ノード電圧は真の電源電圧を上回る準静的オフセットに向かって累積します。リーク電流の大きさとサンプリングのタイミングはどちらも決定論的で再現可能なため、このオフセットは体系的なものです。つまり、測定サイクル全体にわたって一定であり、特性評価と補償が可能です。定常状態の DC オフセットは、サンプルあたりの印加とポーリング期間あたりの放電との電荷バランスを考慮して推定できます。

## 6 設計上の緩和手法

0mA のウェット電流を使用するアプリケーションでは、マルチプレクサ接続の過渡リークの影響を管理するために、3 つの補完的アプローチが利用できます。どの方法を選択するかは、システム コストの制約、許容される PCB 面積、必要な測定精度によって決まります。

### 6.1 方法 1: 電圧源の強化

最も直接的なアプローチは、INx ピンでのテブナン ソース インピーダンスを低減することです。これにより、サンプリング時間中に印加される過渡電流によって大きな電圧変動が引き起こされないようにします。パッシブ ネットワークと INx ピンの間に配置された低インピーダンスのバッファ アンプは、アクティブに駆動された低インピーダンスのソースを提供します。このソースは、INx ノードで測定可能な偏差なしに  $I_{LKG}$  過渡電流を供給または吸収できます。このアプローチにより、サンプリング スパイクとそれに関連するオフセットが完全に排除されるため、追加の較正は必要ありません。その代わり、BOM コストが増大し、PCB 面積が増加し、TIC12400-Q1 のポーリングがアクティブな低消費電力スリープ状態を含めてすべての動作モードでバッファに電力を供給することが必要となります。

### 6.2 方法 2: 外部 RC 補償 (推奨)

よりコスト効率の高いアプローチは、INx ピンに外部容量を直接追加することです。式 1 からわかるように、 $C_{IN}$  を大きくすると、電圧ステップ  $\Delta V$  がそれに比例して減少します。ベンチ測定では、15nF 以上のコンデンサを使用するとスパイク振幅が大幅に減衰し、容量をさらに増やすことで、その影響を引き続き低減できることが確認されています。必要に応じて、 $T_{POLL}$  に対する  $R_{EXT} \times C_{IN}$  の時定数に基づいて、ノードの放電動作を制御し、ポーリング サイクル間の電荷の蓄積を防止するために、並列プルダウン抵抗を内蔵することができます。設計者は、 $R_{EXT}$  と  $C_{IN}$  によって形成される RC 時定数がスイッチ状態検出速度を損なうレベルまで信号セトリングを遅らせず、かつ測定対象の信号に比べてコンデンサのリーク電流が無視できる程度であることを確認する必要があります。

### 6.3 方法 3: 静的オフセット較正

RC 補償後の残留オフセットが依然として必要な精度スレッショルドを超えている場合は、オフセットの体系的な特性により、工場出荷時または実環境での較正によって修正できます。リーク電流とタイミングは決定論的であるため、結果として発生するオフセット  $\Delta V_{offset}$  は一定で、測定サイクル全体にわたって再現可能です。そのため、補正された ADC 結果は次の式で得られます。

$$V_{corrected} = V_{ADC} - \Delta V_{offset} \quad (2)$$

ベンチ測定とシミュレーションの相関で示されるように、代表的な動作条件で  $\Delta V_{offset}$  がシステム レベルで特性評価されている場合、残りの合計誤差を動作電圧範囲全体にわたって 1% 未満に低減できます。この方法では、パッシブ信号ネットワークにすでに設置されているもの以外のハードウェア部品を追加する必要がないため、コストの制約が厳しく、バッファアンプを追加できない設計では魅力的です。

## 7 まとめ

0mA のウェット電流モードについて TIC12400-Q1 データシートに規定されている最大  $\pm 110\mu\text{A}$  の入力リーク電流 ( $I_{\text{LKG}}$ ) は、すべての動作条件、電源電圧、温度、内部デバイスの状態を網羅するワーストケースの限度です。INx ピンに印加される連続 DC 電流ではありません。ベンチ評価では、このリーク電流は ADC またはコンパレータによる各測定に関連する短いマルチプレクサ アクティブのサンプリング時間中のみ印加され、その持続時間は設定されたサンプリング時間 ( $T_{\text{adc}}$  または  $T_{\text{comp}}$ ) によって直接決まることが確認されます。

INx ピンに印加される外部電圧が、パッシブ抵抗バイダやスライドレオスタットなどのハイインピーダンスソースから派生した場合、この過渡リーク電流によって INx ノードの容量が充電され、各ポーリング イベントに同期して狭い電圧スパイクが発生します。RC 放電時定数がポーリング期間に対して長い場合、準静的なオフセットが INx ノードに蓄積され、ADC が真の定常状態入力電圧よりも高い値を報告する可能性があります。この動作は完全に決定論的で再現可能であるため、次の 1 つまたは複数のシステムレベルのアプローチによって効果的に管理できます。そのアプローチとしては、低インピーダンスのバッファにより外部電圧源を強化すること、式 1 に従って過渡電圧ステップを低減するための適切な外部容量を追加すること、残留オフセットを静的で較正可能な誤差として特性評価することがあります。これらの設計上の検討事項に適切に対処されているため、TIC12400-Q1 では幅広い車載用 BCM および ZCM アプリケーションにわたって、パッシブ信号ソースを使用して確実にアナログ電圧検出を実行できます。

## 8 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[TIC12400-Q1 24 入力マルチ スイッチ検出インターフェイス \(MSDI\)、車載システム向け、ADC 内蔵、可変ウェット電流対応](#)』データシート。
2. テキサス インスツルメンツ、『[TIC12400-Q1 マルチ スイッチ検出インターフェイス \(MSDI\) の構成手順](#)』アプリケーションノート。
3. テキサス インスツルメンツ、『[設計の効率と信頼性を向上する車体制御モジュールのリソース](#)』技術記事。

## 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](#)、[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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月