

障害保護に対応するアナログ・スイッチIC、ディスクリートの保護部品が不要に

著者：Paul O'Sullivan

概要

堅牢性に優れた電子回路を設計しようとする、多くの場合、1つの課題に直面することになります。その課題とは、過電圧などから内部回路を保護するためのディスクリート部品を数多く使用しなければならないことです。結果として、設計に要する時間や、コスト、実装スペースが想定以上にかさむという事態に陥ります。本稿では、まず過電圧やESD、ラッチアップに対する保護機能を備えるアナログ・スイッチICのアーキテクチャを紹介します。続いて、そうした障害保護に対応したスイッチが備える性能上の長所や優位性について、従来のディスクリート保護部品によるソリューションと比較しながら説明します。それを通して、高精度のシグナル・チェーンで求められる性能を実現しつつ、業界を牽引する障害保護機能を提供するスイッチICについてご理解いただきます。さらに、まったく新たなスイッチのアーキテクチャと、それをICとして実現するアナログ・デバイゼス (ADI) 独自の高耐圧プロセスについて解説します。これらの技術を適用することで、障害保護機能を備えるADIの新たなスイッチ/マルチプレクサ製品群「ADG52xxF」、「ADG54xxF」は実現されています。

高性能のアナログ・シグナル・チェーンでは、アナログ入力の保護がシステム設計者の泣きどころになることが少なくありません。ディスクリート部品によって実現可能な保護レベルとアナログ性能（リーク電流やオン抵抗など）とは、通常は重要なトレードオフの関係になります。

アナログ・デバイゼス (ADI) は、過電圧やESD、ラッチアップに対する保護機能（以下、障害保護機能）を備えるアナログ・スイッチIC（以下、障害保護）を提供しています。ディスクリートの保護用部品を、障害保護機能を備えるスイッチ/マルチプレクサICで置き換えることにより、アナログ性能、堅牢性、対策に必要な実装面積の面で大きなメリットが得られます。一般に、過電圧保護用の部品は、外部ストレスにさらされる入力と感度の高い後段の回路の間に配置されます。その一例としては、プロセス制御用のシグナル・チェーンにおいてセンサーからの信号を受け取る入力部が挙げられます。

本稿では、過電圧という事象によって生じる問題について詳細に説明します。続いて、ディスクリート部品を用いた従来の過電圧保護の方法とその欠点について検討します。そのうえで、障害保護機能を備えるアナログ・スイッチの機能と、それがシステムにもたらすメリットについて解説します。最後に、業界を牽引する障害保護機能を備えたADIのアナログ・スイッチ製品群を紹介します。

過電圧によって何が起るのか？

アナログ・スイッチICに、電源電圧 (V_{DD} または V_{SS}) か

らダイオードの降下電圧分だけ外側にずれた入力電圧が印加されたとします。その場合、ICが備えるESD（静電気放電）保護用のダイオードが順方向にバイアスされ、入力信号から電源に向けて電流が流れます（図1）。この電流によってICにダメージが加わることがあります。また、電流を適切に制限しないと、ラッチアップが発生してしまう可能性もあります。

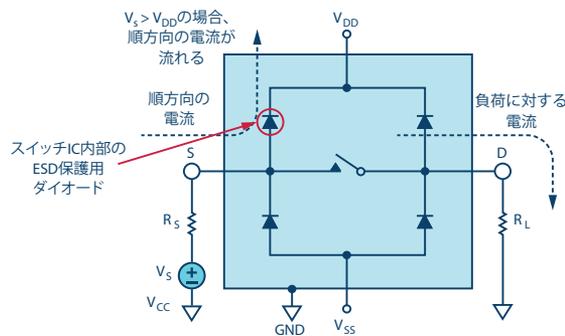
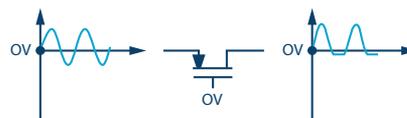


図1. 過電圧が印加された場合の電流パス

スイッチに電源が供給されていない場合には、以下に示すような状況が起こり得ます。

- 電源ピンがフローティングである場合、入力信号がESD保護用のダイオードを介して電源レールに電力を供給することになり得る。その場合、 V_{DD} ピンの電圧は入力信号からダイオードの降下電圧分の範囲内にある。つまり、同じ電源レールを使用する他の部品と同様に、スイッチにも電源が供給されているのと同じような状態になる。その結果、シグナル・チェーン上の他のデバイスが、予期せぬ動作をしたり、制御できない動作状態に陥ったりする恐れがある
- 電源ピンがグラウンド・レベルにある場合、スイッチを構成するPMOSが負のゲート・ソース間電圧 V_{GS} によってオンになる。その結果、スイッチはクリップした信号を出力するので、電源が供給されていない後段の部品にダメージが及ぶ可能性がある（図2）。電源ピンにダイオードが接続されている場合、それが順方向にバイアスされることによって信号は0.7Vにクリップする



- ▶ PMOSは負の V_{GS} によりオンになる
- ▶ PMOSがオンなので、信号が出力される

図2. 電源ピンがグラウンド・レベルにある場合の過電圧信号の挙動

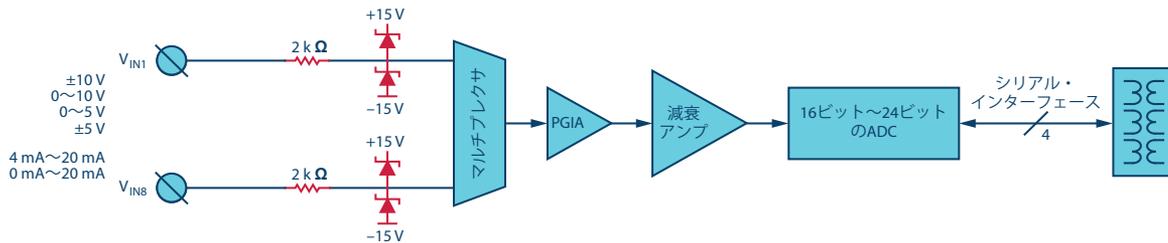


図3. ディスクリート部品による過電圧保護

ディスクリート部品による保護の方法

従来、設計者はディスクレートの保護用部品を使用して入力保護を行っていました。

障害が発生したときの電流の制限には、値の大きい直列抵抗が使用されます。また、過電圧の信号については、電源レールに付加されたショットキー・ダイオードまたはツェナー・ダイオードによってクランプします。多重化されたシグナル・チェーンにおける過電圧保護の例を図3に示しました。

しかしながら、そうしたディスクレートの保護用部品を使用することには、以下のようなデメリットがあります。

- 直列抵抗は、マルチプレクサのセトリング時間を増大させる。直列抵抗は、全般的にセトリング時間が長くなるように作用する
- 保護用のダイオードは、計測の精度や線形性に影響を及ぼすリーク電流の増大や容量の変動を招く
- 電源がフローティングの状態では、電源に接続されたESD保護用ダイオードによるクランプ機能が働かない

従来のスイッチのアーキテクチャ

図4に、従来のスイッチのアーキテクチャを簡素化して示しました。スイッチ（図4の右側中央）の入力部と出力部には、各電源レールに対するESD保護用のダイオードがあります。図の左側にあるのが、過電圧保護のために外付けされているディスクリート部品です。この部品は、電流を制限するための直列抵抗と、過電圧をクランプするための電源用ショットキー・ダイオードを備えています。より過酷な環境では、多くの場合、追加の保護素子として双方向のTVS（Transient Voltage Suppressor）が必要になります。

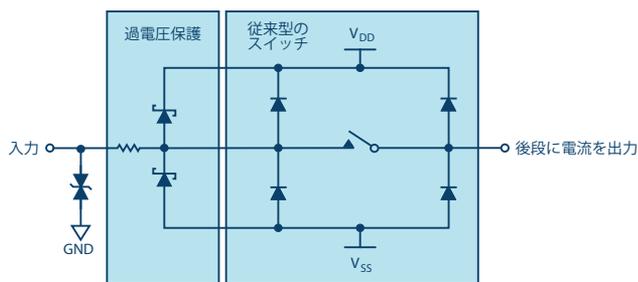


図4. 外付けのディスクリート部品によるスイッチICの保護方法

障害保護に対応するスイッチ

図5に示したのは、障害保護に対応するスイッチICのアーキテクチャです。図4と比較すると、入力側のESD保護用ダイオードが双方向のESD保護用セルに置き換わっています。そのため、電源レール用のESD保護用ダイオードが入力電圧範囲を制限することはありません。言い換えれば、入力は製造プロセスの限界の電圧まで許容できます。例えば、障害保護に対応するADIの新たなスイッチICであれば、±55Vまで対応可能です。

ほとんどの場合、出力側については従来と同じようにESD保護用のダイオードを使用します。通常、出力側については過電圧保護を求められることはないからです。

入力側のESD保護用セルは、優れた機能/性能を提供します。「ADG5412F」は、この種のESD保護用セルを採用したクワッドSPSTスイッチです。この製品の場合、HB-M（Human Body Model）で5.5kVのESD耐性を実現しています。

なお、IEC（国際電気標準会議）のESD規格（IEC 61000-4-2）や、EFT（Electrical Fast Transient）規格、サージ規格といったより厳格な規格では、外付けのTVSや小型の電流制限用抵抗の使用が求められることがあります。

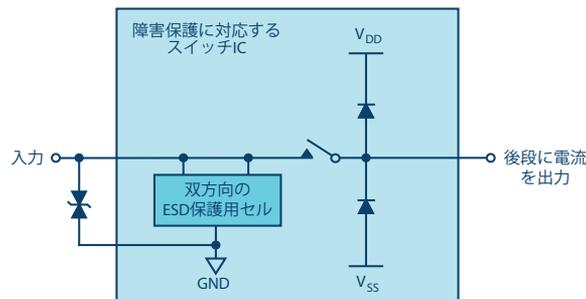


図5. 障害保護に対応するスイッチICのアーキテクチャ

1つのスイッチの入力に過電圧が印加されると、そのチャンネルはオフし、入力がハイインピーダンスになります。他のチャンネルについては、リーク電流が少なく保たれ、性能への影響が最小限に抑えられた正常な状態で動作を継続できます。そのため、過電圧保護のために速度/性能についてほぼ妥協することなくシステムを構成することができます。

障害保護機能を備えるスイッチICを使用すれば、シグナル・チェーンを大幅に簡素化できます。多くの場合、電流制限抵抗やショットキー・ダイオードが必要なくなるからです。また、シグナル・チェーンにリーク電流と歪みをもたらす外付けのディスクリート部品により、システム全体としての性能が制限されることもなくなります。

障害保護に対応するスイッチICの特徴

障害保護に対応するADIのスイッチIC製品群は、ADI独自の高耐圧プロセスで製造されます。電源が供給されている場合にも供給されていない場合にも、 $\pm 55V$ の過電圧保護に対応します。高精度のシグナル・チェーンに障害保護を提供するスイッチとして非常に優れた性能を実現しています。

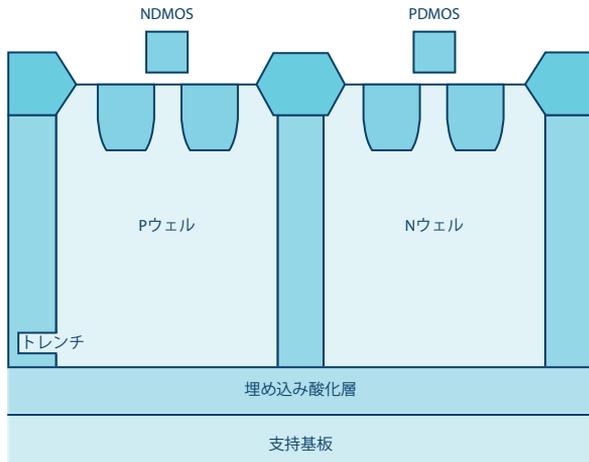


図6. トレンチ・アイソレーション・プロセス

ラッチアップ耐性

ADI独自の高耐圧プロセスは、トレンチ・アイソレーションも採用しています。スイッチを構成するNDMOSとPDMOSの各トランジスタの間には、絶縁性の酸化物層が形成されます。接合アイソレーション型スイッチのトランジスタ間に生じる寄生の接合が排除されるので、スイッチはあらゆる条件に対してラッチアップ耐性を備えることとなります。例えば、ADG5412Fは、最も厳格な規格である $\pm 500mA$ で1秒間というJESD78Dのラッチアップ試験に合格しています。

アナログ性能

ADIの新たなスイッチICは、過電圧に対する保護機能を備えるとともに、ESDに対する高い定格電圧を実現しています。加えて、デジタル入力がない状態で電源を投入したときの状態が既知であるといった特徴も備えており、非常に堅牢性に優れています。これと同時に、業界を牽引する高いアナログ性能も提供します。通常、スイッチの性能は、オン抵抗の大きさと容量/チャージ・インジェクションの大きさのトレードオフになります。できることなら、いずれも小さく抑えることが理想です。また、スイッチの選択は、負荷が高インピーダンスであるか低インピーダンスであるかに依存します。

低インピーダンスのシステム

通常、低インピーダンスのシステムではオン抵抗の小さい部品が使用されます。スイッチについても、オン抵抗を最小に保つ必要があります。電源やゲイン段といった低インピーダンスのシステムでは、負荷と並列のオン抵抗とソース・インピーダンスによってゲイン誤差が生じることがあります。多くの場合、ゲイン誤差はキャリブレーションによって補正できます。しかし、広い信号範囲にわたる、あるいはチャンネル間に及ぶオン抵抗の変動は、キャリブレーションでは補正できない歪みを生成します。このため、低抵抗の回路では、チャンネル間で

のオン抵抗の平坦性や変動に起因する歪み誤差がより大きな問題になります。

図7に示したのは、障害保護に対応するスイッチICの特性の例です。信号の変化に対するスイッチのオン抵抗 R_{ON} の変化を示しています。このICは、 R_{ON} が非常に小さく抑えられていることに加え、平坦性とチャンネル間でのマッチングにも優れています。ADIのスイッチICが備えるスイッチ・ドライバは、特許を取得済みの技術を使って設計されています。これにより、安定した V_{GS} を保証し、全入力電圧範囲にわたって平坦な R_{ON} を実現しています。 R_{ON} のグラフの形状を見るとわかるように、信号の範囲をわずかに狭めることによって最善の性能が得られます。この点がシステム設計におけるトレードオフになります。オン抵抗の変動や全高調波歪みの影響を受けやすいシステムでは、図7のような特性によって顕著なメリットが得られます。

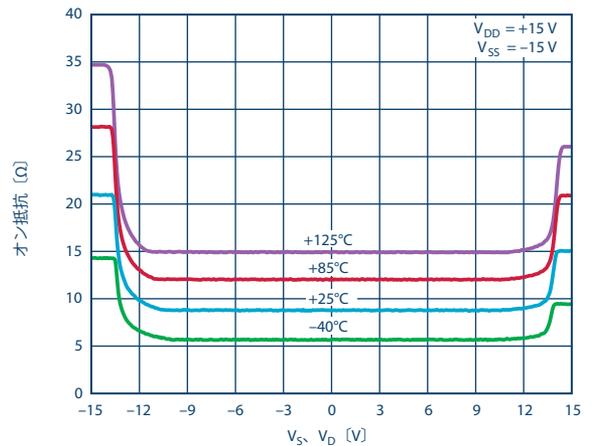


図7. 障害保護に対応するスイッチICのオン抵抗

「ADG5404F」は、これまでにないラッチアップ耐性を備えるマルチプレクサICです。一般に、ラッチアップ耐性の高い製品や過電圧保護機能を備える製品は、標準的な製品に比べてオン抵抗が大きく、平坦性に難があります。例えば、「ADG1404」は業界をリードする小さなオン抵抗を実現した製品です。また、「ADG5404」はラッチアップ耐性が高いことを特徴としますが、過電圧保護機能は備えていません。これに対し、ADG5404Fは V_{GS} を安定化させる手法を適用して設計されているため、ADG1404やADG5404よりも性能が良好です。RTD（測温抵抗体）を使用した温度計測をはじめとする多くのアプリケーションでは、オン抵抗の絶対値よりも平坦性の方が重要です。障害保護に対応するスイッチ製品群は、そうしたシステムにおける性能向上に寄与します。

低インピーダンスのシステムにおける代表的な障害対応としては、障害が発生した際にドレイン出力をオープンにするという事が行われます。

高インピーダンスのシステム

一般に、高インピーダンスのシステムでは、リーク電流、容量、チャージ・インジェクションが小さいスイッチが使用されます。例えば、データ・アキュイジション・システムは、マルチプレクサの出力がアンプの負荷になることから代表的な高インピーダンスのシステムだと言えます。そのようなシステムでは、以下のような点に注意が必要になります。

- 高インピーダンスの回路では、リーク電流が支配的な誤差要因となる。どのような場合でも、リーク電流は重大な計測誤差をもたらす
- セトリング時間を短縮するためには、容量とチャージ・インジェクションを抑えることが必須となる。それにより、データ・アキュイジション・システムにおいて最大のデータ・スループットを得ることが可能になる

障害保護に対応するADIの新たなスイッチは、リーク電流の面でも優れた性能を発揮します。正常動作時のリーク電流は、数nAのレベルです。これは、多くのアプリケーションにおいて正確な計測を行うために必須の特性です。

特に重要なのは、入力チャンネルの1つが故障したとしても、リーク電流の性能は非常に良好に保たれる点です。このことは、そのチャンネルが故障から回復するのを待つことなく、他のチャンネルでは計測を継続でき、システムの停止時間を短縮できるということを意味します。図8に、8：1のマルチプレクサ「ADG5248F」に過電圧が印加された場合のリーク電流の測定結果を示しました。

高インピーダンスのシステムにおける代表的な障害対応としては、障害が発生した際にドレイン出力を電源レールに誘引（pull）するということが行われます。

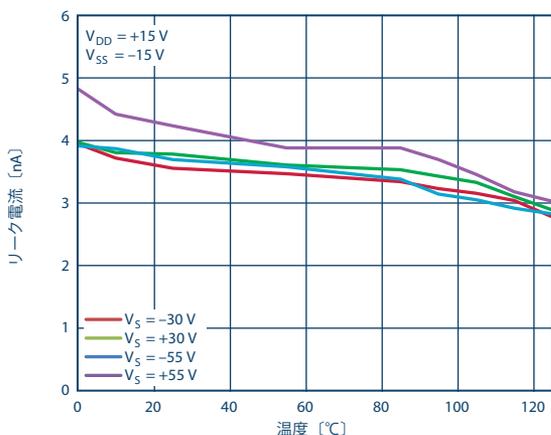


図8. ADG5248Fにおける過電圧発生時のリーク電流と温度の関係

故障の診断

ADIの新たなスイッチのほとんどは、故障の発生を知らせるデジタル・ピンを備えています。FFピンは一般的な故障に対応するフラグを出力します。そのフラグは、入力チャンネルのうち1つが故障中であることを表します。一方、SFピンは、特定の入力に故障が発生した際にデバッグを行うために使用可能なピンです。

これらのピンは、システムの故障の診断を行う際に役立ちます。最初に、FFピンがユーザーに故障に知らせます。それを受けたユーザーは、デジタル入力をひとつおりチェックします。次に、SFピンによって、どのスイッチ（1つまたは複数）が故障中であるかを特定します。

システムにもたらされるメリット

図9に、故障保護に対応するADIのスイッチ製品群がシステムにもたらすメリットについてまとめました。システム設計者にとってのメリットの1つは、高精度のシグナル・チェーンにおいて最適なアナログ性能が確実に得られるようになることです。もう1つは、システムの堅牢性を高められることです。

特徴	システムにもたらすメリット
障害からの保護 ±55Vの過電圧保護	後段の回路へのダメージの防止 ディスクリートの保護部品の削減
障害の検出 障害の発生を知らせる デジタル出力インジケータ	障害の発生源に関するアラート 障害検出用の複雑なソフトウェア・ルーチンの削減
ESDに対する保護 HBMで5.5kVのESDに対応	基板実装の容易化 ESD保護用の部品の削減
高い精度/性能 オン抵抗が小さく平坦性に優れる リーク電流が少ない	信号の歪みの防止 システムの性能の最大化

図9. 障害保護に対応するADIのスイッチICの特徴とメリット

ここまで述べてきたように、ディスクリートの保護部品と比べた場合のメリットは明らかです。独自の高耐圧プロセスとまったく新たなアーキテクチャにより、障害保護に対応するADIのスイッチ製品群は、競合ソリューションに勝る数多くの利点を備えています。そうしたメリットについてまとめると以下のようになります。

- 業界をリードするオン抵抗の平坦性により、高精度の計測に対応できる
- 障害発生時のリーク電流は、競合ソリューションに比べて1/10に抑えられる。そのため、障害の影響を受けていない他のチャンネルは継続動作が可能
- アナログ・スイッチとしての最適な性能を維持しつつ、障害を高い精度で判定するための閾値となるセカンダリ電源に対応する
- システムの障害を診断するための高度なフラグ機能

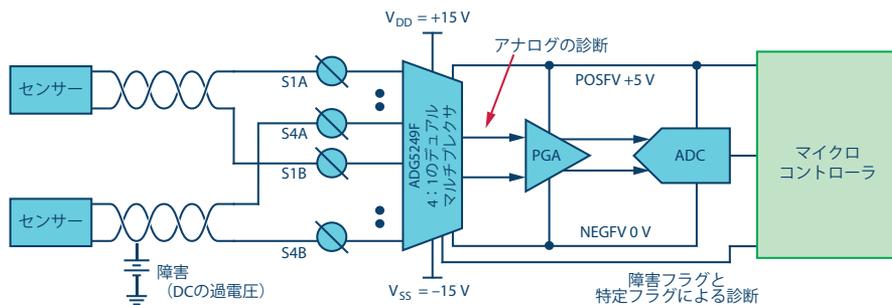


図10. プロセス制御アプリケーションの例

各製品の概要

表1. 低オン抵抗の製品ファミリー

品番	主機能	障害検出のトリガとなる閾値	障害発生時の出力	障害に対応するフラグ
ADG5412F ADG5413F	クワッドSPST	プライマリ電源	オープン	汎用フラグ
ADG5412BF ADG5413BF	クワッドSPST、双方向のOVP	プライマリ電源	オープン	汎用フラグ
ADG5462F	クワッドチャンネル・プロテクタ	セカンダリ電源	セカンダリ電源への誘引またはオープン（デフォルト）	汎用フラグ
ADG5404F	4:1のマルチプレクサ	プライマリ電源	セカンダリ電源への誘引またはオープン（デフォルト）	汎用/特定フラグ
ADG5436F	デュアルSPDT	プライマリ電源	セカンダリ電源への誘引またはオープン（デフォルト）	汎用/特定フラグ

表2. 低容量/低チャージ・インジェクションの製品ファミリー

品番	主機能	障害検出のトリガとなる閾値	障害発生時の出力	障害に対応するフラグ
ADG5208F	8:1のマルチプレクサ	プライマリ電源	電源レールへの誘引	なし
ADG5209F	4:1の差動マルチプレクサ	プライマリ電源	電源レールへの誘引	なし
ADG5248F	8:1のマルチプレクサ	セカンダリ電源	セカンダリ電源への誘引	汎用/特定フラグ
ADG5249F	4:1の差動マルチプレクサ	セカンダリ電源	セカンダリ電源への誘引	汎用/特定フラグ
ADG5243F	トリプルSPDT	セカンダリ電源	セカンダリ電源への誘引	汎用/特定フラグ

アプリケーションの例

図10に、アプリケーションの例を示します。これは、プロセス制御に使用するシグナル・チェーンです。マイクロコントローラを使用して、RTDや熱電対などの温度センサー、圧力センサー、湿度センサーといった多くのセンサーからの信号を監視します。プロセス制御では、工場などで使用される長いケーブルの一端にセンサーが接続されることがあります。そのため、ケーブルの各部で障害が発生する可能性があります。

この例では、マルチプレクサ「ADG5249F」を使用しています。同ICは、容量とリーク電流を最小限に抑えるように最適化されています。この種の小信号センサーを使用する計測では、リーク電流が少ないことが非常に重要です。

これらのスイッチは±15V以外でも動作します。セカンダリ電源は後段のPGAとA/Dコンバータ（ADC）を保護するために5Vとグラウンドに接続されます。

センサーからのメインの信号はマルチプレクサを経由してPGA、ADCの順に伝送されます。一方、障害診断の信号は、障害が発生した際、割込みを指示するためにマイクロコントローラに直接送信されます。これにより、ユーザーは、障害の発生を通知する警報を受け取ることができ、どのセンサーに障害が発生しているのかを判断することが可能になります。障害に関するデバッグを行うために技術者が派遣され、必要があれば故障したセンサーやケーブルの交換が行われます。

各製品のリーク電流は、障害が発生した場合でもわずかしか流れないため、センサーの1つが停止して交換まで待機することになっても、他のセンサーによる監視は継続できます。リーク電流が多い製品を使用した場合、1つのチャンネルで問題が起きると、その修理が完了するまで、他のすべてのチャンネルも使用できなくなってしまう。

図11に、もう1つのアプリケーション例を示しました。こ

れは、データ・アクイジションに使用するシグナル・チェーンの一部です。この用途では、チャンネル・プロテクタ「ADG5462F」が役立ちます。PGAが±15Vの電源レールを使用する一方で、ADCの入力信号範囲は0V~5Vとなっています。

ADG5462FはPGAとADCの間に配置します。最適なオン抵抗を得るために、プライマリ電源としては±15Vを使用し、セカンダリ電源としては0Vと5Vを使用します。ADG5462Fは、正常に動作しているときには信号をそのまま通過させます。PGAから過電圧が出力された場合には、それを0Vと5Vの間にクランプすることでADCを保護します。そのため、図10のアプリケーション例と同様に、対象とする信号は動作時にオン抵抗の平坦な領域に入るようバイアスします。

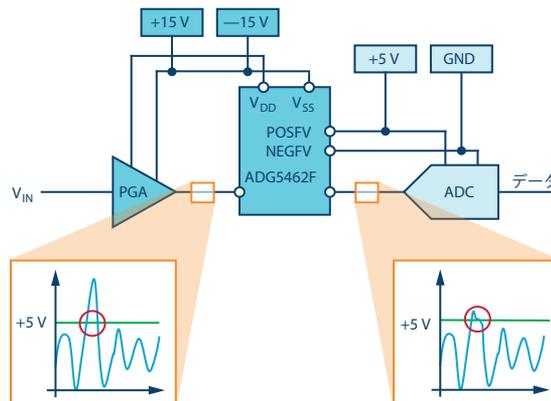


図11. データ・アクイジション・アプリケーションの例

まとめ

従来型のディスクリット保護部品をADIの新たなスイッチ/マルチプレクサで置き換えれば、高精度のシグナル・

チェーンにおいて多くのメリットを得ることができます。基板上の実装面積を削減可能であることに加え、ディスクリット部品を置き換えることによって性能面でも顕著なメリットがもたらされるでしょう。

本稿で紹介したように、ADIは障害保護に対応する数多くのスイッチ/マルチプレクサ製品を提供しています。それらのうち、最新の製品ファミリーを表1と表2に示しました。これらの製品は、ADI独自のプロセスで製造されています。その特徴は、耐圧が高く、ラッチアップ耐性が強いことです。いずれの製品も、高精度のシグナル・チェーンに対して、業界をリードする機能と性能を提供します。



著者：

Paul O'Sullivan (paul.osullivan@analog.com) は、アイルランドのリムリックにあるADIのリニア/高精度技術事業部門に所属するアプリケーション・エンジニアです。以前はパワー・マネージメント製品群を、現在はスイッチ/マルチプレクサ製品群を担当しています。ユニバーシティ・カレッジ・コークで学士号を、リムリック大学で工学修士号を取得し、2004年にADIに入社しました。



Paul O'Sullivan