Maintenance prédictive sur liaisons filaires robustes pour l'Industrie 4.0

Richard Anslow, ingénieur d'applications système, et Dara O'Sullivan, responsable des applications, division Connected Motion and Robotics, Analog Devices

Maintenance prédictive, un élément essentiel au succès de l'Industrie 4.0.

Les initiatives lancées par les pouvoirs publics telles que Industry 4.0 en Allemagne et Made in China en Chine, accélèrent le développement de l'automatisation en réseau de la fabrication. Cette automatisation est en outre enrichie par l'ajout de systèmes à base de capteurs intelligents, ce qui augmente la quantité de données pour surveiller et contrôler les processus de production. À titre d'exemple, l'initiative Made in China 2025 a pour objectif de développer rapidement l'industrie des hautes technologies et au premier chef les secteurs des véhicules électriques, des NTIC, de la robotique avancée et de l'intelligence artificielle. La mise au point de solutions toujours plus perfectionnées requiert des moyens tout aussi évolués pour assurer leur fiabilité.

La maintenance prédictive (*Condition-based Monitoring* — CbM) des systèmes robotiques et des machines tournantes (turbines, ventilateurs, pompes et autres moteurs) enregistre en temps réel des données liées à l'état de santé et aux performances de ces outils ; les interventions de maintenance sont ainsi ciblées et le contrôle optimisé. Menée en amont du cycle de vie de la machine, cette approche réduit les risques d'interruption de la production, avec à la clé une augmentation de la fiabilité, des économies de coûts significatives et une plus grande efficacité en atelier.

Comment mettre en œuvre une solution de maintenance prédictive câblée ?

La maintenance prédictive des machines industrielles peut s'appuyer sur un large éventail de données collectées par des capteurs (mesures électriques, vibrations, niveau de température, qualité du lubrifiant, valeurs acoustiques), ainsi que sur la mesure de processus tels que le débit ou la pression. Toutefois, les relevés de vibrations sont les plus usités, car ils signalent avec une fiabilité maximale la présence de problèmes mécaniques tels qu'un balourd ou des défauts de roulements mécaniques. Cet article se concentre sur l'utilisation de la détection des vibrations, mais il convient de souligner que cette méthodologie s'applique également aux données fournies par d'autres capteurs.

Les moyens utilisés pour transmettre des données entre le nœud de détection (capteurs) et le contrôleur principal ou le cloud dépendent dans une large mesure des applications. Dans de nombreux cas, les données font l'objet d'un certain traitement local au niveau du nœud d'extrémité ; l'ensemble des informations est ensuite envoyé soit à une passerelle réseau via une liaison sans fil, soit directement au serveur analytique ou au cloud par l'intermédiaire d'une liaison cellulaire. Dans ces situations, la quantité de données transmises est généralement minime et la consommation d'énergie faible, car une batterie peut alimenter le nœud d'extrémité. Dans d'autres exemples, il est nécessaire de transmettre des données de détection brutes. Les données provenant de plusieurs capteurs doivent parfois être alignées et fusionnées avant de les analyser. La transmission de données brutes est également requise lors de leur utilisation à des fins de contrôle en temps réel. Dans ce cas, l'utilisation d'une interface filaire pour transmettre les données sera plus appropriée.

Dans le domaine industriel, la maintenance prédictive peut s'appuyer sur la chaîne de signaux Analog Devices composée d'accéléromètres à base de microsystèmes électromécaniques (MEMS), de microcontrôleurs faible consommation et d'interfaces isolées et filaires *i*Coupler® ; les données de santé des machines entre un capteur esclave de maintenance prédictive distant et un

contrôleur maître sont extraites, conditionnées et transmises avec une parfaite fiabilité en vue de leur analyse. Au fil du temps, ces données peuvent servir à créer des modèles logiciels capables de déterminer les changements de comportement de la machine, et maintenir son intégrité. Dans certaines applications, comme les machines à commande numérique (CNC), les données permettront également d'optimiser les performances du système en temps réel.

Parmi les défis inhérents à la mise en œuvre d'une interface de maintenance prédictive câblée figurent la robustesse face aux interférences électromagnétiques (CEM) sur des câbles longue distance, l'intégrité des données transmises à un débit élevé (pour l'envoi des données de maintenance prédictive en temps réel) et les divergences entre la couche physique et le protocole de communications. Fort de son expertise au niveau système et de la chaîne des signaux, Analog Devices propose plusieurs options pour implémenter une interface de maintenance prédictive sur liaison filaire.

Cet article présente tout d'abord les solutions d'interface sur liaison filaire conçues par Analog Devices pour raccourcir le cycle de conception et la durée des tests par le client, et accélérer la commercialisation de solutions de maintenance prédictive à usage industriel. Dans la deuxième partie, nous aborderons de façon détaillée la conception de la couche physique, tant au niveau du contrôleur maître que de l'esclave de maintenance prédictive sur liaison câblée.

Implémentation d'un design de maintenance prédictive sur liaison câblée

Lors de la conception et du déploiement d'une solution de maintenance prédictive sur liaison filaire, plusieurs aspects et compromis doivent être pris en compte quant aux performances du système.

Tout d'abord, avant de choisir un accéléromètre MEMS, il convient de connaître le type de défaut à surveiller, de sorte que la bande passante et les performances de bruit du circuit MEMS correspondent aux exigences du système. Le traitement au niveau des nœuds d'extrémité nécessite un processeur parfaitement adapté afin d'assurer au système une flexibilité maximale.

Deuxièmement, la conception d'un système de maintenance prédictive sur liaison câblée exige l'utilisation d'un protocole de communications filaire et d'une couche physique appropriés pour transmettre les données en temps réel à un débit élevé. La mise en œuvre d'une interface filaire impose l'examen attentif des performances électromagnétiques (CEM), du câblage servant à transmettre les données, des connecteurs et de l'acheminement de l'électricité sur le réseau câblé.

Sélectionner le bon accéléromètre MEMS

Pour choisir un capteur de vibrations MEMS qui répond à vos exigences, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

Nombre d'axes

Le nombre d'axes surveillés est généralement lié au type de défaut et au montage du capteur. Si le défaut suit un axe réellement dominant, et si cet axe présente une voie de transmission évidente, un capteur monoaxial sera probablement suffisant. La détection triaxiale est utile pour les défauts qui acheminent de l'énergie sur plusieurs axes, ou lorsque le chemin de transmission d'énergie du défaut considéré n'est pas clairement connu.

Types de défaut

Le type de défaut surveillé influe de façon considérable sur le choix du capteur. La densité de bruit des capteurs et la bande passante sont deux spécifications importantes à cet égard. En effet, elles déterminent le niveau de vibrations et la plage de fréquence qui peuvent être extraits avec fiabilité. Par exemple, des phénomènes tels qu'un balourd et un défaut d'alignement sur des machines rotatives fonctionnant à des régimes relativement bas peuvent nécessiter l'utilisation d'un capteur à faible densité de bruit, mais avec des besoins relativement limités en bande passante ; *a contrario*, la détection d'un défaut d'engrenage peut nécessiter l'utilisation d'un capteur conjuguant une faible densité de bruit et une bande passante élevée.

Exigences de performances

Outre le type de défaut, il importe de bien comprendre les exigences de la maintenance prédictive en matière de performances. Dans le cas d'indicateurs d'état élémentaires de type « feu de circulation », la détection d'alarme nécessite un niveau de performances différent pour effectuer des pronostics sophistiqués. Si cette distinction s'applique clairement à l'analyse et aux algorithmes déployés, les conséquences sur le choix du capteur ne sont pas négligeables. Plus les performances du capteur sont élevées en matière de bande passante, de densité de bruit et de linéarité, plus les capacités d'analyse seront importantes.

Choisir un traitement de signal adapté

Les principaux critères de conception sont les suivants :

Signaux fournis par l'accéléromètre

Le signal émis en sortie de l'accéléromètre est analogique ou numérique série, généralement de type SPI. L'utilisation d'un capteur de sortie analogique nécessite un étage de conversion analogique/numérique, ainsi qu'un certain conditionnement du signal. On utilisera un convertisseur analogique/numérique (CA/N) discret avec conditionnement par préamplificateur ou un convertisseur analogique/numérique intégré dans un microcontrôleur.

Exigences de traitement au niveau des nœuds d'extrémité

Certains algorithmes élémentaires de traitement du signal ou FFT (transformée de Fourier rapide) peuvent s'avérer nécessaires au niveau du nœud d'extrémité afin de réduire la charge sur la liaison de données et/ou sur le serveur/contrôleur central.

Exigences relatives au protocole de transmission de données

La sortie du convertisseur A/N ou du capteur est généralement de type SPI (*Serial Peripheral Interface)*, c'est-à-dire sans aucun mécanisme de vérification de l'intégrité des données, d'horodatage, de fusion des données transmises par différents capteurs, etc. Il peut être intéressant d'encapsuler les données du capteur dans un protocole supérieur au niveau du nœud d'extrémité avant de procéder à la transmission. Cette méthode qui permet d'accroître la robustesse et la flexibilité de l'interface du capteur ajoute une exigence pour que le flot de données soit correctement manipulé et conditionné au niveau du nœud d'extrémité.

Pour plus d'informations, téléchargez l'article publié par Analog Dialogue sous le titre *Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application*.

Porter la sortie de l'accéléromètre sur un bus de communications câblé

Comme nous l'avons vu précédemment, le signal généré en sortie de l'accéléromètre est typiquement analogique ou numérique série, généralement de type SPI. La sortie SPI peut être traitée localement (ce qui assure une certaine flexibilité dans le choix du protocole) avant d'être ajoutée à l'interface de la couche physique, ou portée directement sur la couche physique.

L'interface SPI est une interface série asymétrique non équilibrée qui convient aux courtes distances. Pour la porter directement sur la couche physique à des distances supérieures, il est possible d'utiliser des circuits de commande et de réception de ligne RS-485. La signalisation RS-485 est équilibrée, différentielle, intrinsèquement insensible au bruit et robuste sur des câbles de grande longueur.

L'utilisation de l'interface SPI sur des distances supérieures entre un esclave et un maître SPI soulève certains défis. Le protocole SPI est par nature synchrone, avec un signal d'horloge (SCLK) initié par le maître SPI. Les lignes de données SPI — données du maître vers l'esclave actif (MOSI) et données de l'esclave actif vers le maître (MISO) — sont synchronisées sur le signal d'horloge SCLK, ce qui peut être obtenu avec fiabilité sur de courtes distances. L'interface SPI dispose également d'un signal de sélection de puce CS (*Chip Select*) actif à l'état bas qui permet, le cas échéant, d'adresser l'esclave individuellement.

Sur les câbles couvrant de longues distances, le signal SCLK enregistre un retard de propagation

de l'ordre de 500 ns pour un câble de 100 mètres. Pour un transfert de données en mode MOSI, les signaux MOSI et SCLK sont également retardés par le câble. Cependant, les données envoyées au maître par le signal MISO esclave seront désynchronisées à hauteur du double du retard de propagation du câble.

Pour rétablir la synchronisation entre le maître et l'esclave, il est possible de renvoyer le signal d'horloge de l'esclave vers le maître, ou de compenser le retard du câble dans le microcontrôleur maître en déphasant le signal d'horloge. Le déphasage du signal d'horloge doit correspondre au retard total du système. La note d'application AN-1397 indique de façon détaillée comment compenser le retard au niveau d'un microcontrôleur maître.

Couche physique de communications filaires

En cas de communications sur de longues distances, il est indispensable de pouvoir s'appuyer sur une couche physique robuste. Comme nous l'avons vu, la signalisation RS-485 est équilibrée, différentielle et intrinsèquement insensible au bruit. Le bruit du système se couple de façon égale à chaque fil d'un câble à paires torsadées RS-485. Un signal émet l'inverse de l'autre signal et les champs électromagnétiques couplés sur le bus RS-485 s'annulent mutuellement. Cette technique permet de réduire les interférences électromagnétiques (EMI) du système. D'autres atouts font de la signalisation RS-485 la solution idéale pour les systèmes de maintenance prédictive, à savoir :

- des débits plus élevés, jusqu'à 50 Mbits/s sur des longueurs de câble inférieures à 100 mètres ;
- la possibilité d'utiliser des câbles mesurant jusqu'à 1 000 mètres avec des débits inférieurs ;
- les paires comprenant plusieurs circuits de commande/récepteurs RS-485 et RS-422 peuvent convertir des signaux SPI bidirectionnels en signaux de bus RS-485 avec un nombre de composants minime ;
- la large plage d'entrée de mode commun autorise des différences au niveau du potentiel de masse entre maître et esclave.

Compatibilité électromagnétique de l'interface filaire

Sur des câbles longue distance, les réseaux de communications peuvent être exposés à des risques tels que des bruits de mode commun élevés, des différences de potentiel de masse ou des tensions transitoires élevées.

Les sources de bruit, conduites et rayonnées, peuvent affecter la fiabilité des communications sur une longueur de câble de 100 mètres. Il est possible d'accroître l'immunité à ces sources de bruit en utilisant la technologie d'isolation à base de transformateurs sur puce *i*Coupler d'Analog Devices. La note d'application AN-1398 résume les performances d'immunité aux tensions transitoires industrielles courantes obtenues grâce à la technologie *iCoupler*.

L'immunité aux transitoires de mode commun (CMTI) désigne la capacité d'un isolant à rejeter les transitoires de bruit à des tensions et des vitesses de balayage élevées, ainsi qu'à maintenir des communications sans erreur. Les appareils isolés du signal et de l'alimentation avec technologie *iso*Power® présentent une immunité aux transitoires de mode commun d'au moins 25 kV/µs, et peuvent également résister à des transitoires de 100 kV/µs sans verrouillage permanent ni dommage.

Dans les environnements d'automatisation industrielle, les concepteurs de systèmes n'ont généralement aucun contrôle sur l'installation électrique qui alimente leur réseau de communications. Ils partent généralement du principe qu'il existe des différences de potentiel de masse. Dans les dispositifs de commande de mouvement, des différences de potentiel de masse de l'ordre de plusieurs centaines de volts peuvent être enregistrées. Pour fonctionner de manière fiable dans ces environnements, un nœud de communications RS-485 requiert des lignes d'alimentation et de transmission de données galvaniquement isolées. Les appareils isolés du signal et de l'alimentation avec technologie *iso*Power présentent une tension de service continue

maximale de 600 V crête (isolation de base) ou 353 V crête (isolation renforcée). L'isolation de base autorise des communications fiables en présence d'importantes différences de potentiel de masse, tandis que l'isolation renforcée protège les opérateurs de l'usine contre des chocs électriques en atelier.

Dans un réseau de communications sur liaison filaire, les connecteurs et les câbles peuvent être exposés à de multiples tensions transitoires élevées. La norme CEI 61800-3 relative aux exigences de compatibilité électromagnétique applicables aux entraînements électriques de puissance à vitesse variable au niveau du système impose une protection minimale contre les décharges électrostatiques de ± 4 kV au contact et de ± 8 kV dans l'air. Les émetteurs-récepteurs RS-485 de nouvelle génération commercialisés par Analog Devices assurent une protection contre les décharges électrostatiques supérieures à ±8 kV au contact et à ±8 kV dans l'air, conformément à la norme CEI 61000-4-2.

Alimentation fantôme sur lignes de transmission de données

La distribution des lignes d'alimentation et de transmission de données entre les contrôleurs maîtres et les nœuds de capteurs de maintenance prédictive déportés nécessite des solutions innovantes en vue de réduire les coûts de câblage. La cohabitation entre les données et l'alimentation électrique dans une seule paire torsadée permet de réaliser d'importantes économies au niveau du coût système, et d'utiliser des connecteurs de circuits imprimés (PCB) plus compacts au niveau des nœuds de capteurs d'extrémité où l'espace disponible est limité.

L'alimentation et les données sont distribuées sur une paire torsadée à l'aide d'un réseau inductance-condensateur. Les données à fréquences élevées sont couplées aux lignes de données par des condensateurs en série également chargés de protéger l'émetteur-récepteur RS-485 contre les tensions de bus en courant continu. Une alimentation électrique est raccordée au contrôleur maître par l'intermédiaire d'une inductance connectée à une ligne de données ; l'alimentation est ensuite filtrée par l'intermédiaire d'une inductance au niveau du nœud de capteurs esclave utilisé pour la maintenance prédictive à l'extrémité opposée du câble.

Les inductances situées aux deux extrémités du câble doivent être parfaitement adaptées pour éviter tout bruit en mode différentiel, la fréquence propre étant d'au moins 10 MHz pour éviter toute interférence avec les salves produites en temps réel par les systèmes de mesure des vibrations de nouvelle génération d'Analog Devices. Il convient de noter que la solution de couplage de l'alimentation et des données doit être ajoutée à une ligne de données où le contenu de données en courant continu n'est pas attendu, par exemple les extensions MOSI ou MISO vers RS-485.

Solutions recommandées et compromis de performances

Compte tenu des considérations de conception énoncées précédemment, les composants suivants forment une option idéale pour créer des solutions de mesure des vibrations sur liaison filaire à la fois robustes et adaptées aux environnements industriels.

- ADcmXL3021 : module de détection de vibrations triaxial à large bande passante et faible niveau de bruit ;
- ADuM5401/ADuM5402 : circuits d'isolation quatre voies jusqu'à 2,5 kV avec convertisseur continu-continu intégré ;
- ADM3066E : émetteur-récepteur RS-485 half duplex à 50 Mbits/s ;
- ADM4168E : émetteur-récepteur RS-422 double voie à 30 Mbits/s
- LTC2858-1 : émetteur-récepteur RS-485 full duplex à 20 Mbits/s ;
- ADP7104 : régulateur LDO CMOS faible bruit 20 V/500 mA

Solutions recommandées

Le capteur MEMS ADcmXL3021 est utilisé dans les trois solutions préconisées. Cet accéléromètre se caractérise par une densité de bruit ultra-faible (25 µg/√Hz) qui assure une excellente résolution. Il affiche également une large bande passante (du continu à 10 kHz avec une stabilité de 5 %), ce qui permet de suivre les principales signatures vibratoires sur un grand nombre de plateformes et de machines. L'ADcmXL3021 se présente sous la forme d'un boîtier en aluminium

mécaniquement optimisé qui assure un couplage homogène avec les capteurs MEMS intégrés dans une large gamme de fréquences. Cette solution garantit que la signature vibratoire de l'équipement mesuré est extraite et conditionnée avec une fiabilité maximale.

L'ADcmXL3021 est disponible avec une sortie SPI qui peut être interfacée directement avec des appareils RS-485/RS-422 ou, indirectement, avec un microprocesseur et/ou une isolation du signal et de l'alimentation *i*Coupler, avec des appareils RS-485/RS-422 (Figure 1). Concernant la surveillance en temps réel des signatures vibratoires sur équipements industriels, l'accéléromètre ADcmXL3021 dispose d'un mode *streaming* en temps réel qui fonctionne en mode SPI à environ 12 Mbits/s.

Pour assurer l'interface en mode *streaming* SPI en temps réel sur bus RS-485, il convient de sélectionner des composants présentant de solides performances en transmission de données. Les émetteurs-récepteurs RS-485/RS-422 proposés sous les références ADM3066E, ADM4168E et LTC2858-1 fonctionnent à des débits supérieurs ou égaux à 20 Mbits/s.

Pour les options 1 et 2 représentées à la Figure 1 avec des connexions SPI-RS-485 directes, les circuits ADM3066E et ADM4168E fournissent une interface robuste pour implémenter une configuration SPI 3+1 (3 x réception, 1 x émission) pour un nœud de capteurs de vibrations esclave. Le signal de réception Chip Select (CS) SPI est implémenté à l'aide de l'ADM3066E, et les signaux SPI CLK, MOSI et MISO avec le circuit ADM4168E. En mode *streaming* temps réel, l'ADcmXL3021 envoie un signal d'interruption au microcontrôleur maître pour signaler qu'une nouvelle salve de données est disponible pour capture. Le signal d'interruption (/BUSY) peut également être transmis au maître par l'ADM4168E.

La solution complète se compose de trois signaux envoyés par le maître à l'ADcmXL3021 (MOSI, CS, CLK), et de deux signaux renvoyés par l'ADcmXL3021 au maître (MISO, /BUSY). Les cinq signaux asymétriques peuvent être convertis en signaux différentiels en utilisant seulement deux composants : un émetteur-récepteur ADM4168E et un émetteur-récepteur ADM3066E. Les signaux différentiels sont traités au moyen de connecteurs et de prises RJ50 qui occupent sur le circuit imprimé une surface quasiment identique à celle des connecteurs Ethernet RJ45 standard. Les émetteurs-récepteurs ADM3066E et ADM4168E offrent une protection contre les décharges électrostatiques (ESD) supérieures à ±8 kV au contact et ±8 kV à l'air (norme CEI 61000-4-2), ce qui garantit un niveau de robustesse idéal lorsqu'ils sont directement connectés à une interface câblée.

En ce qui concerne l'option 3, le microcontrôleur permet de « prétraiter » la sortie SPI du module de détection de vibrations ADcmXL3021, ainsi que de convertir le protocole entre l'interface SPI et d'autres interfaces série (UART, par exemple). Le protocole asynchrone UART est couramment utilisé avec des interfaces RS-485 ; il se compose de signaux d'émission et de réception, ainsi que d'un signal de validation d'émission, qui peuvent tous être directement connectés à un émetteur-récepteur RS-485 full-duplex, tel que le LTC2858-1. Utilisé en full duplex, le LTC2858-1 permet de transférer des données en mode bidirectionnel simultané, répondant ainsi aux exigences de transfert de données bidirectionnel de l'interface SPI. Le microcontrôleur peut gérer la conversion entre le protocole SPI synchrone et le protocole UART asynchrone.

Les circuits ADuM5401/ADum5402 sont les circuits d'isolation du signal et de l'alimentation les plus compacts du marché. Ils embarquent un convertisseur continu-continu qui délivre jusqu'à 500 mW de puissance régulée et isolée sous 5,0 V ou 3,3 V à partir d'une tension d'entrée de 5,0 V.

Comme le montre la Figure 1, l'option 2 inclut le circuit d'isolation ADuM5401 alimenté en 5 Vcc par le bus de données et qui applique une alimentation isolée de 3 V au capteur ADcmXL3021. L'ADuM5401 comprend également 4 voies d'isolation du signal dans une configuration adaptée à l'isolation SPI en configuration 3+1.

L'option 3 représentée en Figure 1 contient le circuit d'isolation ADuM5402, similaire à l'ADuM5401, la principale différence étant que l'ADuM5402 dispose de deux voies d'isolation numérique en émission et de deux voies d'isolation numérique en réception.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les circuits d'isolation ADuM5401/ADuM5402 augmentent l'immunité électromagnétique de l'interface de maintenance prédictive sur liaison

filaire, protégeant le capteur ADcmXL3021 contre les interférences en tensions élevées et les différences de potentiel de masse au niveau de l'interface RS-485.

Compromis de performances

Le tableau 1 compare les trois solutions proposées à l'aide d'un certain nombre de paramètres clés, tels que la flexibilité de conception, la surface des circuits imprimés, le coût et la complexité de la solution, ainsi que les performances électromagnétiques (CEM).

L'intégration d'un microcontrôleur au niveau du nœud de capteurs de maintenance prédictive assurera une flexibilité de conception accrue, mais au détriment d'une augmentation de la surface occupée sur le circuit imprimé et de la complexité du logiciel. Dans la mesure où le nœud de maintenance prédictive maître disposera d'un processeur, l'option 3 présentée à la Figure 1 correspondra à un système à deux microcontrôleurs qui sera moins rapidement opérationnel qu'avec un seul microcontrôleur au niveau du nœud de maintenance prédictive maître.

Les options 1 et 2 offrent une flexibilité de conception réduite, mais se distinguent par un déploiement plus rapide, dans la mesure où elles permettent d'établir des liaisons « SPI vers RS-485 » transparentes et peu complexes. Les options 1 et 2 permettent également de réduire la surface occupée sur le circuit imprimé par rapport à l'option 3, qui exige une surface accrue sur la carte électronique pour héberger le microcontrôleur et les circuits associés (par exemple, un oscillateur d'horloge et plusieurs composants passifs).

L'ajout de l'isolation *i*Coupler (signal et alimentation) aux options 2 et 3 a un impact minime sur la surface occupée sur la carte tout en augmentant les performances électromagnétiques CEM au-delà de ce que peut assurer une protection intégrée avec des émetteurs-récepteurs RS-485/RS-422.

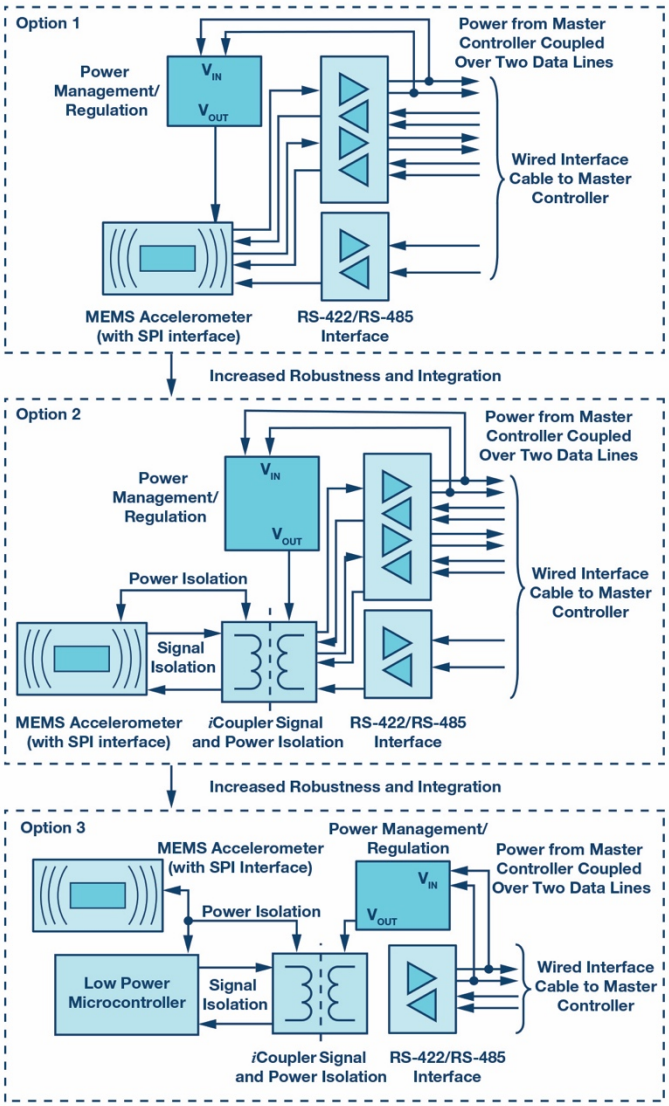


Figure 1. Trois options permettent de réaliser une solution de maintenance prédictive MEMS sur liaison câblée conjuguant robustesse et haut niveau d'intégration

Table 1. Comparatif des différents compromis entre les trois options de maintenance prédictive proposées

Option	Souplesse de conception	Surface occupée sur la carte	Coût de la solution	Complexité/ Intégration	Compatibilité électromagnétique
1	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne
2	Faible	Faible/ Moyenne	Faible/ Moyen	Faible	Élevée
3	Élevée	Moyenne	Moyen	Moyenne	Élevée

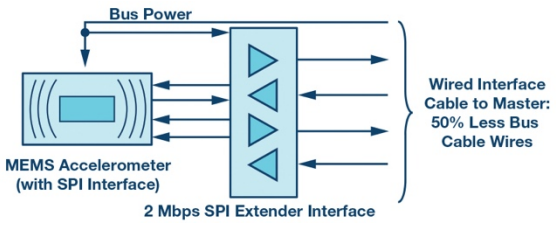


Figure 2. L'interface d'extension SPI LTC4332 réduit les coûts de câblage.

Solutions de transmission de données à bas débit

En ce qui concerne les applications filaires fonctionnant à des débits peu élevés (c'est-à-dire inférieurs à 2 Mbits/s), le module d'extension SPI LTC4332 propose une solution d'implémentation alternative permettant de renforcer une liaison SPI entre un maître et un nœud de capteurs esclaves distant. Le LTC4332 peut transmettre des données SPI, notamment un signal d'interruption sur deux câbles à paires torsadées. En résumé, cette solution assure d'importantes économies de coûts en divisant par deux le câblage de bus par rapport aux solutions standard.